

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
TECNOLOGIA NUCLEAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CAPACIDADE DA REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO PARA O
DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NUCLEAR**



PRIMEIRO-TENENTE GUILHERME CARVALHO BRANCO

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE GUILHERME CARVALHO BRANCO

CAPACIDADE DA REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO PARA O
DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NUCLEAR

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear.

Orientador:
Prof. Fábio de Camargo, PhD

CIAA
Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE GUILHERME CARVALHO BRANCO

CAPACIDADE DA REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO PARA O
DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NUCLEAR

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear.

Aprovada em _____

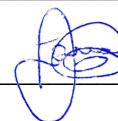
Banca Examinadora:

Prof. Fábio de Camargo, PhD – CINA



CT Leonardo Oldani Felix, M.Sc. – CIAA

CT (EN) Danilo Pinheiro Faria, M.Sc. – DDNM



AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu bom Deus, que me fortaleceu e sempre foi minha base em todos os momentos da minha vida.

À minha esposa Larissa que, em meio aos desafios do nascimento do nosso primeiro filho, sempre esteve ao meu lado, sendo meu porto seguro e minha melhor amiga durante.

Aos meus pais, Robson e Telma, e à minha irmã, Gabrielly, que tanto me apoiaram ao longo desse ano, sempre se fazendo presente nos momentos de dificuldade que se apresentavam.

Aos meus companheiros da Turma Almirante Gastão Motta, mais especificamente àqueles que fizeram parte do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear, que compartilharam comigo os bons e maus momentos e juntos podemos chegar ao fim dessa jornada.

Ao meu orientador, Dr. Fábio de Camargo, sempre disposto a ajudar e que contribuiu para enriquecer este trabalho.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”

Josué 1:9

Resumo

A relevância da tecnologia nuclear tem crescido consideravelmente nos últimos anos, desempenhando um papel crucial em diversas áreas, como medicina, energia e pesquisa científica. Diante disso, torna-se fundamental que o Brasil mantenha uma rede de calibração robusta e eficiente para garantir a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos nesses setores. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade da Rede Brasileira de Calibração (RBC) no contexto do desenvolvimento da tecnologia nuclear, utilizando como metodologia uma pesquisa comparativa, que permite a compreensão das características, estrutura e capacidades da RBC em comparação com as potências mundiais. A análise comparativa dos recursos de calibração disponíveis no Brasil em contraste com aqueles encontrados em países reconhecidos pelo seu domínio na área nuclear é realizada com base no banco de dados do Escritório Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), e foi enriquecida por meio de entrevistas realizadas com profissionais vinculados ao Programa Nuclear da Marinha. Por meio dessa comparação busca-se identificar lacunas e áreas de aprimoramento para fortalecer os recursos de calibração no Brasil. Os resultados indicam que a RBC possui uma sólida infraestrutura e capacidade técnica para a calibração de equipamentos industriais em geral, se destacando frente a países como Uruguai e Argentina. Contudo, no que tange à área nuclear, há oportunidades de melhoria, especialmente na disponibilidade de laboratórios para calibrar medidores de radiação ionizante ou detectores de gases. A capacidade de um país em relação à tecnologia nuclear não pode ser avaliada apenas com base na comparação das suas capacidades de calibração e medição com outros países, devendo se levar em consideração uma série de fatores internos e externos. Apesar disso, é inegável a importância que essa área do conhecimento tem para o desenvolvimento de uma indústria nuclear nacional, sendo fundamental um maior investimento para o setor e a participação de instituições como a Marinha nesse processo.

Palavras-chave: calibração; RBC; tecnologia nuclear;

Abstract

The relevance of nuclear technology has grown considerably in recent years, playing a crucial role in several fields such as medicine, energy, and scientific research. In light of this, it becomes essential for Brazil to maintain a robust and efficient calibration network to ensure the quality and reliability of results obtained in these sectors. Therefore, this paper aims to assess the capacity of the Brazilian Calibration Network (RBC) in the context of nuclear technology development, employing a comparative research methodology that allows understanding the characteristics, structure, and capabilities of the RBC in comparison with global powers. The comparative analysis of calibration resources available in Brazil, in contrast to those found in countries recognized for their expertise in the nuclear field, was conducted based on the BIPM database and it has been enriched through interviews with professionals associated with the Brazilian Navy's Nuclear Program. Through this comparison, the goal is to identify gaps and areas for improvement to strengthen calibration resources in Brazil. The results indicate that the RBC has a solid infrastructure and technical capacity for calibrating industry equipment in general, surpassing countries like Uruguay and Argentina. However, concerning the nuclear field, there are opportunities for improvement, especially in the availability of laboratories to calibrate ionizing radiation meters or gas detectors. A country's capacity in nuclear technology cannot be evaluated solely by comparing its calibration and measurement capabilities with other nations, but a range of internal and external factors must be considered. Despite this, the undeniable importance of this knowledge area for the development of a national nuclear industry underscores the need for increased investment in the sector and the involvement of institutions such as the Navy in this process.

Keywords: calibration; RBC; nuclear technology;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hierarquia do sistema metrológico.....	16
Figura 2 – Gráfico Comparações-Chaves e Suplementares por País.....	27
Figura 3 – Gráfico Comparações-Chaves e Suplementares para Radiações Ionizantes.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparações-chave por país.	26
Tabela 2 – Capacidades de Calibração e Medição (CMC) por país.	28

LISTAS DE SIGLAS

A2LA	Associação Americana para Acreditação de Laboratórios (<i>American Association for Laboratory Accreditation</i>)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAB	Conselho Nacional de Acreditação ANSI (<i>ANSI National Accreditation Board</i>)
ANSI	Instituto Nacional Americano de Padrões (<i>American National Standards Institute</i>)
ANSN	Autoridade Nacional de Segurança Nuclear
BIPM	Escritório Internacional de Pesos e Medidas (<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>)
Cgcre	Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO
CIPM	Comitê Internacional de Pesos e Medidas (<i>Comité international des poids et mesures</i>)
CINA	Centro Industrial Nuclear de Aramar
CMC	Capacidade de Calibração e Medição (<i>Calibration and Measurement Capability</i>)
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CTMSP	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica (<i>International Atomic Energy Agency</i>)
IAS	Serviço de Acreditação Internacional (<i>International Accreditation Service</i>)
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
ILAC	Cooperação Internacional de Acreditação de Laboratórios (<i>International Laboratory Accreditation Cooperation</i>)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
KCDB	Banco de Dados das Comparações-Chave (<i>Key Comparison Database</i>)
MRA	Acordo de Reconhecimento Mútuo (<i>Mutual Recognition Arrangement</i>)
NBR	Norma Brasileira

NVLAP	Programa Nacional Voluntário de Acreditação de Laboratórios (<i>National Voluntary Laboratory Accreditation Program</i>)
PJLA	Laboratório de Acreditação Perry Johnson (<i>Perry Johnson Laboratory Accreditation</i>)
PNM	Programa Nuclear da Marinha
PRIS	Sistema de Informações de Reatores de Potência (<i>Power Reactor Information System</i>)
PWR	Reator de Água Pressurizada (<i>Pressurized Water Reactor</i>)
RBC	Rede Brasileira de Calibração
RMO	Organizações Regionais de Metrologia (<i>Regional Metrology Organizations</i>)
SI	Sistema Internacional de Unidades
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivos Específicos.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 Calibração	15
2.2 A Calibração e a Qualidade Nuclear	17
2.3 Rede Brasileira de Calibração	18
2.4 Grandezas Físicas Importantes à Tecnologia Nuclear	19
2.4.1 Pressão	20
2.4.2 Vazão	21
2.4.3 Temperatura	21
2.4.4 Nível.....	22
2.4.5 Radiação.....	23
3 METODOLOGIA	23
3.1 Classificação da Pesquisa	23
3.2 Limitações do Método	24
3.3 Universo e Amostragem	24
3.4 Coleta e Tratamento de Dados	24
3.4.1 Levantamento Documental	24
3.4.2 Entrevistas.....	24
3.4.3 Análise Comparativa.....	25
4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	25
4.1 Análise da RBC em um contexto das potências nucleares e expoentes	25
4.2 Entrevistas com profissionais vinculados ao PNM	29
4.2.1 Entrevista com profissionais responsáveis pela calibração no CINA.....	29
4.2.2 Entrevista com profissional responsável pela radioproteção do CTMSP	30
5 CONCLUSÃO	31
5.1 Considerações Finais	32
5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos	33
REFERÊNCIAS	34
APÊNDICE - Entrevistas transcritas	37

1 INTRODUÇÃO

A metrologia é uma ciência que muitas vezes passa despercebida, mas possui um papel importante na vida cotidiana. A precisão das medições, a qualidade dos produtos consumidos e a confiabilidade dos serviços utilizados estão ligados a essa ciência. Nesse contexto, a calibração, um processo essencial para garantir a qualidade das medições, está no centro da metrologia.

A calibração é um processo que remonta à antiguidade e tem evoluído ao longo dos séculos para se tornar um componente fundamental do desenvolvimento da indústria e da engenharia. Sua história e importância são intrinsecamente ligadas ao avanço tecnológico e à busca incessante por medições precisas, com qualidade e segurança nos processos industriais e projetos de engenharia.

Passando pela história da humanidade pode-se perceber relação entre as evoluções tecnológicas e a demanda por uma melhor metrologia. A Revolução Industrial do século XVIII trouxe uma exigência crescente por medições precisas nas fábricas, levando à criação de instrumentos de medição cada vez mais sofisticados. Em meados do século XIX, o Sistema Métrico Decimal trouxe uma padronização crucial para a calibração, com unidades de medida baseadas em constantes naturais. No século XX, a revolução tecnológica trouxe consigo uma proliferação de instrumentos de medição altamente complexos, intensificando a necessidade de uma calibração regular e precisa.

Sendo assim a importância da calibração na indústria é inegável. Primeiramente, a precisão das medições é essencial para garantir a qualidade dos produtos. Instrumentos calibrados garantem que as especificações sejam atendidas, evitando defeitos e retrabalho, o que economiza tempo e recursos. A eficiência operacional também é aprimorada por meio da calibração. Equipamentos de produção calibrados garantem que os processos funcionem sem problemas, reduzindo o tempo de inatividade não planejado e aumentando a produtividade. Em projetos de engenharia, instrumentos precisos são usados para realizar medições críticas em uma ampla gama de disciplinas, desde a construção civil até a engenharia nuclear.

Em laboratórios de pesquisa e desenvolvimento, a calibração garante que os experimentos científicos e testes de materiais sejam confiáveis e produzam resultados precisos. Além disso, a calibração desempenha um papel fundamental na conformidade regulatória. Em muitos setores, como a indústria nuclear, normas rigorosas exigem medições confiáveis, de

forma que o não cumprimento dessas regulamentações pode resultar em penalidades substanciais.

Não se pode deixar de citar a segurança, uma das principais preocupações na engenharia e em especial na área nuclear. A calibração de instrumentos de monitoramento e controle é fundamental para garantir que os sistemas e estruturas estejam operando dentro de parâmetros seguros, evitando acidentes e falhas catastróficas.

O advento da era atômica, marcado pelo desenvolvimento dos primeiros reatores, inaugurou uma era de possibilidades e desafios únicos para a calibração. A necessidade de medições acuradas em ambientes radioativos e a constante busca por maior exatidão levaram a avanços significativos nos métodos e padrões de calibração aplicados a instrumentos utilizados em experimentos nucleares.

Desde o surgimento da tecnologia nuclear, o Brasil vem demonstrando interesse em desenvolver-se e adquirir conhecimentos no setor para fins científicos, médicos, industriais e militares. Inicialmente, atuou como supridor de minerais atômicos, principalmente as areias monazíticas, para os Estados Unidos desde 1943 até meados dos anos cinquenta. Posteriormente, sob a liderança do Almirante Álvaro Alberto - Patrono da Ciência, Tecnologia e Inovação na Marinha e pioneiro da energia nuclear no Brasil - elaborou-se o primeiro projeto para dominar essa energia, desde a mineração até a fabricação dos elementos combustíveis a serem utilizados nos reatores [1].

Nesse sentido, o Almirante Álvaro Alberto idealizou, à época, o Conselho Nacional de Pesquisas, atual Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, sendo o seu primeiro Presidente. Tal conselho tinha o objetivo de coordenar o desenvolvimento da energia nuclear no país e fortalecer o setor científico. Mais adiante, em função do programa “Átomos para Paz”, houve um acordo de colaboração com os Estados Unidos em 1955, por meio do qual o Brasil recebeu o seu primeiro reator de pesquisa em 1958 e o projeto para a construir autonomamente um outro reator de pesquisa em 1962 [1].

A indústria nuclear não se restringe apenas ao estudo do átomo e ao seu controle e utilização. Ao longo desse caminho de evolução desta tecnologia, surgem diversas demandas em outras áreas do conhecimento, que podem se apresentar como barreiras para o seu desenvolvimento. A necessidade de dispor e ter o conhecimento para se trabalhar com materiais específicos, como o *zircaloy* (liga a base de zircônio), a constante evolução de sistemas e *softwares* necessários às análises de segurança cada vez mais rigorosas, o desenvolvimento de técnicas de solda especiais, que devem ser capazes de suportar as grandes variações de

temperatura e pressão de um reator, são exemplos de como a área nuclear não pode se aprimorar sem ter um alicerce estabelecido nas mais diversas áreas do conhecimento.

Nesse contexto, temos a calibração como uma peça crucial para sustentar os avanços e garantir a confiabilidade, integridade e a precisão das medições em um cenário tão complexo e sensível. A segurança e a eficiência operacional tornam-se prioridades críticas, exigindo inovações em métodos de monitoramento, controle e detecção. Além disso, a diversificação de aplicações demanda uma abordagem cada vez mais precisa e confiável na mensuração de variáveis nucleares. Instrumentos de monitoramento de radiação, detectores nucleares, equipamentos de análise isotópica e demais dispositivos utilizados no universo nuclear dependem da calibração adequada para fornecer dados corretos. Esse processo não é apenas um requisito técnico; é um elemento crítico na salvaguarda da segurança nuclear, na avaliação precisa de processos e na conformidade com padrões internacionais.

A complexidade inerente à tecnologia nuclear apresenta desafios específicos em termos de calibração. A diversidade de instrumentos e a necessidade de precisão extrema requerem avanços contínuos em metodologias de medição. A busca por padrões internacionais, a implementação de práticas aprimoradas e a inovação em protocolos de calibração são essenciais para manter a confiabilidade das medições em um ambiente onde a precisão é vital e podem se apresentar como obstáculos ao crescimento do país na área.

À medida que se avança para um futuro onde a energia nuclear, a medicina nuclear e a pesquisa científica desempenham papéis cada vez mais proeminentes, a calibração emerge como um pilar invisível, mas essencial, que sustenta essa trajetória.

A busca pela excelência na calibração nuclear não é apenas técnica, é um compromisso com a segurança, a confiabilidade e a contribuição significativa para o avanço científico e tecnológico do país. Assim, o desenvolvimento da tecnologia nuclear e os avanços em calibração caminham juntos, moldando um futuro onde a precisão é a base sobre a qual deve-se construir os benefícios e superar os desafios da era nuclear brasileira.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a capacidade da RBC frente à demanda atrelada ao desenvolvimento da tecnologia nuclear.

1.1.1 Objetivos Específicos

Além da avaliação das capacidades da RBC frente às atuais demais da área nuclear, o presente trabalho visa abordar os seguintes pontos, de forma a complementar contribuir para que seja alcançado o objetivo geral:

- Entender a estrutura e as capacidades atuais da RBC;
- Traçar paralelos com países que se destacam como precursores e detentores da tecnologia nuclear;
- Apontar os caminhos a serem seguidos pela RBC a fim de acompanhar uma evolução da tecnologia nuclear no Brasil;
- Entender o papel da Marinha e do seu Programa Nuclear para o desenvolvimento da RBC no que diz respeito à área nuclear;

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Calibração

Conforme citado anteriormente, ao longo do curso da história a Metrologia, que tem como um de seus pilares a calibração, acompanhou e serviu como um dos alicerces para a evolução tecnológica das mais diversas áreas do conhecimento. À medida que o tempo avançou, tornou-se evidente que as medições desempenham um papel essencial em praticamente todos os processos industriais, bem como nas tomadas de decisões. Essa ciência da medição tem historicamente buscado estabelecer parâmetros confiáveis e universais com credibilidade e qualidade, abrangendo uma ampla gama de setores, incluindo a área nuclear, a indústria, a medicina, o comércio, entre outros [2].

O Vocabulário Internacional de metrologia (VIM) [3], traduzido e publicado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e amplamente aceito internacionalmente, define a calibração como:

Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação [3].

Essa definição implica que a calibração é um processo que visa determinar e ajustar, se necessário, os erros sistemáticos de um instrumento de medição, de forma a mantê-lo mais

preciso e confiável, sendo realizada em relação a padrões de medição que são reconhecidos como referências em suas respectivas grandezas. Portanto, ela não apenas verifica a precisão do instrumento, mas também estabelece uma relação quantitativa entre os valores medidos e os valores de referência das grandezas.

Quando um instrumento é calibrado, ele é submetido a um processo de comparação com um padrão de referência conhecido e rastreável. Os resultados dessa comparação ajudam a determinar os erros sistemáticos e as incertezas associadas às medições do instrumento. Ao seguir um rastro por meio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações até padrões internacionais é estabelecida a rastreabilidade metrológica e as medições realizadas com o instrumento podem ser consideradas confiáveis e comparáveis globalmente [3].

Sob supervisão da Escritório Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), na ponta da pirâmide da rastreabilidade, estão os padrões internacionais dedicados a assegurar a consistência global das medições e sua vinculação ao Sistema Internacional de Unidade (SI). O BIPM desempenha essa função de acordo com as diretrizes estabelecidas pela Convenção do Metro, um tratado diplomático [4].

Figura 1 – Hierarquia do sistema metrológico.



Fonte: Referência [4].

Nesse contexto, surge o Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA) do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), por meio do qual os Institutos Nacionais de Metrologia, função exercida no Brasil pelo INMETRO, validam a equivalência internacional de seus padrões, assim como os certificados de calibração e medição que emitem [4]. Como

resultado do CIPM MRA temos a Capacidade de Calibração e Medição (CMC) que é uma especificação a qual descreve a capacidade de um laboratório de calibração ou de ensaio em realizar medições ou calibrações em uma determinada grandeza metrológica, dentro de um intervalo específico, com uma incerteza declarada. O objetivo da CMC é fornecer informações sobre a competência técnica de um laboratório em uma determinada área de medição ou calibração. A CMC é uma especificação importante para acreditação de laboratórios e para a aceitação de resultados em nível internacional [5].

As CMCs são baseadas nos resultados das comparações-chave (*key comparisons*) realizadas pelos laboratórios nacionais de metrologia participantes do CIPM MRA. As comparações-chave são correlações internacionais de medição organizadas pelo BIPM com o objetivo de estabelecer valores de referência para grandezas de medição. As CMCs são armazenadas e gerenciadas no Banco de Dados das Comparações-Chave (KCDB), que é um banco de dados mantido pelo BIPM para arquivar informações sobre as comparações-chave e as capacidades de medição e calibração dos laboratórios participantes, sendo uma ferramenta importante para a implementação do CIPM MRA [5].

2.2 A Calibração e a Qualidade Nuclear

A busca incessante pela qualidade é um imperativo para as organizações modernas, independentemente de seu setor de atuação. Nesse contexto, a calibração emerge como uma ferramenta indispensável para garantir a confiabilidade e a precisão das medições utilizadas nos processos produtivos e de controle de qualidade.

A norma ABNT NBR ISO 9001:2015 [6], que estabelece os requisitos para sistemas de gestão da qualidade, destaca a importância da calibração como uma das atividades necessárias para garantir a conformidade com os requisitos do cliente e a melhoria contínua do sistema de gestão da qualidade. Tal norma estabelece que as organizações devem manter registros de calibração para todos os equipamentos de medição utilizados no processo produtivo ou na prestação de serviços. Além disso, exige que as organizações estabeleçam procedimentos para a calibração dos equipamentos que sejam seguidos rigorosamente [6].

Sob a ótica da indústria nuclear, a qualidade e, conseqüentemente, a calibração assumem um papel de destaque pois, dada a complexidade e a sensibilidade dessas operações, é intrínseca a relação entre qualidade e segurança. Sendo assim, a calibração é um componente essencial que sustenta esses dois pilares em instalações nucleares.

Instrumentos de medição, como detectores de radiação, sensores de temperatura e medidores de pressão, são utilizados para monitorar, controlar e registrar parâmetros críticos em operações nucleares. A precisão dessas medições é vital para avaliar a conformidade com padrões de segurança e qualidade. Instrumentos calibrados fornecem informações confiáveis sobre a operação das instalações e a presença de qualquer anomalia. Isso permite a detecção precoce de problemas e a implementação de ações corretivas antes que eles se transformem em situações críticas.

A qualidade em instalações nucleares abrange uma série de aspectos, desde a construção e manutenção das instalações até o gerenciamento de rejeitos radioativos. A conformidade com padrões rigorosos de segurança, operações confiáveis e a capacidade de cumprir regulamentações estritas são inerentes à indústria nuclear.

Nesse contexto temos a atuação da recém-criada Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). Criada, a partir de uma cisão da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), por meio da Lei 14.222 de 15 de outubro de 2021, tendo como finalidade “monitorar, regular e fiscalizar a segurança nuclear e a proteção radiológica das atividades e das instalações nucleares, materiais nucleares e fontes de radiação no território nacional” [7].

A norma que rege atualmente a qualidade nas atividades nucleares é a norma CNEN NN 1.16 [8], “Garantia da Qualidade para a Segurança de Usinas Nucleoelétricas e outras Instalações”, que tem como objetivo definir os requisitos para o estabelecimento e implementação de Sistemas de Garantia da Qualidade para instalações nucleares e radiativas. Tal norma, assim como a NBR ISO 9001:2015 [6], também destaca a importância da calibração na garantia da qualidade, estabelecendo requisitos específicos para a calibração e controle de equipamentos, incluindo a necessidade de controlar, calibrar e ajustar os equipamentos de teste e medição utilizados em atividades que influem na qualidade, a intervalos especificados ou antes do uso, para manter a precisão dentro dos limites necessários. Além disso, a norma estabelece controles para garantir o manuseio, a armazenagem e o uso correto dos equipamentos calibrados [8].

2.3 Rede Brasileira de Calibração

A RBC é um sistema de laboratórios de calibração credenciados pelo INMETRO, que tem como objetivo garantir a qualidade e a confiabilidade das medições realizadas no Brasil. Composta por laboratórios que possuem competências técnicas e capacitações

vinculadas às indústrias, universidades e institutos tecnológicos, habilitados à realização da calibração. Ela foi criada em 1980 para atender às demandas crescentes por serviços de alta qualidade no Brasil que superavam a capacidade dos laboratórios do INMETRO, desempenhando um papel central no suporte à pesquisa científica, à indústria e a setores críticos, como saúde e segurança [9].

O credenciamento dos laboratórios para integrar a RBC baseia-se na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025: 2017, estabelecendo um mecanismo para demonstrar que os laboratórios empregam um sistema da qualidade e possuem a capacitação técnica necessária para execução de serviços de calibração, garantindo sua capacidade de obter resultados em conformidade com métodos e técnicas reconhecidos no âmbito nacional e internacional [10].

A calibração se divide em dois processos: calibração RBC e calibração rastreada. No processo de calibração RBC, um laboratório acreditado pelo INMETRO emite um certificado, o qual é aceito em diversos países devido à participação do INMETRO em acordos internacionais que visam à padronização de métodos, normas, sistema internacional de medidas e padrões de referência. É emitido um laudo para a RBC, garantindo a avaliação da competência com base em métodos padronizados e auditados, sendo reconhecida a calibração pela Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO (Cgcre) e outros órgãos internacionais.

Por outro lado, na calibração rastreada, é necessário que haja rastreabilidade em relação à RBC. Isso significa que o padrão de referência utilizado deve ser calibrado pela RBC, com o selo do INMETRO. O termo “rastreado” indica que a calibração não é realizada pela RBC, mas que os padrões utilizados foram calibrados em um laboratório acreditado pelo INMETRO, vinculado à RBC [11]. Realizado o serviço, o Certificado de Calibração acompanhará o instrumento durante a sua vida útil. Tal certificado é o registro de que o equipamento cumpre com os valores para os quais foi fabricado [12].

2.4 Grandezas Físicas Importantes à Tecnologia Nuclear

Ao se falar da aplicação da calibração na tecnologia nuclear, cumpre citar as principais grandezas que desempenham um papel central na compreensão, operação e avanço da tecnologia nuclear. Essas grandezas, intrinsecamente vinculadas ao funcionamento de reatores nucleares, experimentos científicos e diversas aplicações industriais, representam os pilares fundamentais sobre os quais repousa o domínio e a aplicação segura da energia nuclear. Sob o ponto de vista da segurança nuclear, tais parâmetros influenciam diretamente nas três

funções de segurança fundamentais em plantas nucleares, elencadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA): controle da reatividade; remoção de calor do reator e do combustível armazenado; e confinamento de material radioativo, proteção contra radiação e controle de liberações radioativas [13]. Com isso, este item visa elucidar a importância crítica dessas magnitudes físicas na delimitação do cenário atual e futuro da tecnologia nuclear, proporcionando uma base sólida para compreender os desafios e as oportunidades inerentes a esse campo científico e tecnológico dinâmico.

A medição das diversas grandezas físicas em ambientes nucleares apresenta desafios únicos, como a presença de radiação e condições operacionais críticas (pressão e temperaturas elevadas). Portanto, a utilização de instrumentos de medição calibrados com precisão, conforme padrões internacionais específicos para a área nuclear, é indispensável para garantir resultados confiáveis e seguros.

2.4.1 Pressão

A pressão, medida em Pascal no SI ou outras unidades como bar e atmosfera, é uma grandeza física que representa a força exercida perpendicularmente por unidade de área. Além de ser a variável de processo mais utilizada na indústria em suas diversas áreas de atuação, a medição e o controle da pressão também integra a medição de uma série de outras variáveis, como vazão, nível e densidade [14].

Tomando como base as funções fundamentais para a segurança em plantas nucleares, citadas anteriormente, tem-se a medição de pressão como um dos pilares das três funções. A medição e controle dessa grandeza pode ser associado à manutenção da integridade física das barreiras utilizadas para o confinamento do material radioativo, desde o revestimento do elemento combustível, passando pelo vaso do reator até a contenção. Além disso, conforme dados do Sistema de Informações de Reatores de Potência (PRIS) [15], desenvolvido e mantido pela IAEA, existem hoje 412 reatores de potência em operação, dentre os quais 303, quase 75%, são do tipo PWR que utilizam a água como refrigerante e moderador. Como se pode perceber em seu próprio nome, nesse tipo de reator o controle da pressão é fundamental, sendo por meio desse controle que se torna possível a manutenção da água em seu estado líquido mesmo em elevadas temperaturas, contribuindo assim para a remoção de calor do núcleo, que será transferido ao secundário para a produção de energia, e para o controle

da reatividade, influenciando na densidade do fluido e conseqüentemente em seu poder de moderação.

2.4.2 Vazão

A vazão representa a taxa de transferência de um fluido, seja líquido ou gasoso, através de um sistema. A medição da vazão é realizada em diferentes contextos, desde a gestão de recursos hídricos até o controle preciso de fluidos em processos industriais e experimentos nucleares. Definida como a quantidade volumétrica ou mássica de um fluido que passa por uma seção transversal em um determinado intervalo de tempo, essa grandeza desempenha um papel fundamental em diversas aplicações relacionadas à tecnologia nuclear [16].

Como já exposto anteriormente, os reatores do tipo PWR representam a grande maioria dos reatores de potência em operação atualmente, com isso temos que a vazão da água, fluido refrigerante e moderador, está diretamente ligada à temperatura e remoção de calor do núcleo e ao controle da reatividade por meio da moderação dos nêutrons liberados pelo processo de fissão dos átomos de Urânio 235, tornando fundamental sua correta medição e controle.

Para além da segurança, a eficiência na transferência de calor é crucial em processos nucleares de geração de energia. A medição precisa da vazão de fluidos refrigerantes ou moderadores contribui para otimizar o desempenho do reator, maximizando a eficiência na produção de energia. Além disso, em experimentos nucleares e laboratórios de pesquisa, onde a precisão é vital, a medição acurada da vazão influencia diretamente nos resultados experimentais. A manipulação controlada de fluidos em experimentos requer uma compreensão detalhada da vazão para garantir a confiabilidade dos dados coletados.

2.4.3 Temperatura

A temperatura é uma grandeza física que mede o grau de agitação térmica das partículas que compõem um sistema, ou seja, relaciona-se com a energia cinética média dessas partículas e pode ser medida por meio de instrumentos chamados termômetros. Existem diversas escalas de temperatura, como a Celsius, a Fahrenheit, a Kelvin, que possuem diferentes pontos de referência e unidades, e cuja escolha depende do contexto e da conveniência de cada situação [17], sendo a última mencionada a empregada no SI.

Na tecnologia nuclear, a temperatura é uma variável fundamental para o controle e a segurança. A medição da temperatura nos reatores nucleares requer métodos específicos, que levem em conta as condições de alta pressão, radiação e corrosão do ambiente. Alguns dos métodos mais usados são os termopares, os termoresistores, os termistores e os pirômetros ópticos.

Mais uma vez, ao se observar as funções de segurança da IAEA, constata-se que essa grandeza exerce influência tanto na remoção do calor do núcleo quanto no controle da reatividade. O controle da temperatura do núcleo é essencial para a manutenção do correto funcionamento do reator e da eficiência de sua operação, seja para a produção de energia elétrica, seja para os demais usos nas áreas da pesquisa, da medicina e da indústria. Além disso, os medidores de temperatura são partes vitais dos sistemas de controle de um reator, percebendo as possíveis flutuações dessa grandeza e atuando, seja com as barras de controle ou com a adição de água contendo boro, para o controle da reatividade.

2.4.4 Nível

A grandeza física “nível” é uma medida da altura ou profundidade de um líquido ou sólido em relação a um ponto de referência. A medição do nível é importante na indústria nuclear, pois permite monitorar e controlar o nível dos fluidos em diversos componentes essenciais ao controle e à segurança da operação das plantas nucleares [17]. A medição precisa do nível é crítica para a segurança e eficiência das operações nucleares, pois ajuda a prevenir falhas no sistema de refrigeração, vazamentos e outros problemas que podem levar a acidentes nucleares.

A medição do nível do pressurizador em reatores PWR, em conjunto com os demais medidores anteriormente citados, fornece informações aos sistemas de controle e emergência das plantas nucleares, alertando sobre possíveis falhas e vazamentos, auxiliando no controle da pressão e temperatura do circuito primário e conseqüentemente na remoção de calor e controle da reatividade do núcleo. Além disso, pode-se citar a medição de nível dos geradores de vapor, também utilizados nos reatores do tipo PWR, que igualmente permite uma avaliação e controle da temperatura e da remoção de calor do primário.

2.4.5 Radiação

A medição da radiação não tem um papel de destaque tão marcante na indústria em geral quanto as demais grandezas abordadas neste trabalho. Trata-se de uma grandeza que ganha proeminência principalmente na indústria nuclear. A radiação refere-se à emissão de partículas subatômicas ou ondas eletromagnéticas provenientes de átomos instáveis. A grandeza radiação abrange desde partículas alfa e beta, até radiação eletromagnética, como raios-X e raios gama [18].

Os monitores ou detectores de radiação têm a função de monitorar de maneira contínua as taxas de dose, a atividade de materiais e a presença de partículas e produtos de reações nucleares. A radiação pode ser medida por meio de detectores de radiação, que convertem a energia da radiação em sinais mensuráveis, existindo vários tipos, como os detectores de cintilação, detectores de gás e detectores semicondutores. Cada tipo de detector tem suas próprias características e é adequado para diferentes aplicações.

É intrínseca a importância do monitoramento da radiação para a segurança e bom funcionamento das plantas nucleares. Esses detectores estão diretamente associados ao controle da reatividade, por exemplo, por meio da medição da população neutrônica, colaborando com o ajuste da criticalidade em especial na partida dos reatores, e ao confinamento e controle de exposição ao material radioativo, sendo crucial para uma detecção precoce de aumentos da radiação, prevenindo contra exposições excessivas e possíveis vazamentos de produtos de fissão devido a falhas nos revestimentos das varetas dos elementos combustíveis. Além disso, a medição da radiação colabora tanto com a medicina nuclear, sendo utilizados para proporcionar diversos diagnósticos e tratamentos, quanto em experimentos científicos, permitindo a caracterização de materiais, a investigação de reações nucleares e contribuindo para avanços na pesquisa.

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

O presente trabalho é caracterizado como uma pesquisa comparativa que visa analisar a capacidade da RBC em relação aos laboratórios de calibração de países de maior desenvolvimento em tecnologia nuclear. Esta abordagem permite uma compreensão das

características, estrutura e capacidades da RBC em comparação com padrões internacionais e aponta os caminhos a serem seguidos a fim de acompanhar uma evolução de tecnologia nuclear no Brasil.

3.2 Limitações do Método

As limitações deste estudo incluem a disponibilidade limitada de informações detalhadas sobre alguns laboratórios internacionais, a variação nos padrões de divulgação de dados entre os países analisados e a possibilidade de obter informações atualizadas em tempo hábil. Tais limitações podem influenciar a abrangência e a precisão das comparações.

3.3 Universo e Amostragem

O universo desta pesquisa abrange a RBC e laboratórios de calibração em países de referência em tecnologia nuclear, como Estados Unidos, França e Reino Unido. A amostra foi selecionada com base na relevância, representatividade e disponibilidade de informações atualizadas. A escolha visa incluir laboratórios que possuam características semelhantes à RBC e que estejam envolvidos no desenvolvimento de tecnologia nuclear.

3.4 Coleta e Tratamento de Dados

A coleta de dados foi realizada em etapas distintas, como apresentado a seguir.

3.4.1 Levantamento Documental

Foi realizado um levantamento junto ao banco de dados da BIPM disponível publicamente. Esses dados forneceram embasamento para uma análise quantitativa da estrutura e das capacidades da RBC e de laboratórios internacionais.

3.4.2 Entrevistas

Entrevistas semiestruturadas foram conduzidas com profissionais vinculados ao Programa Nuclear da Marinha (PNM) diretamente envolvidos em atividades de pesquisa e

desenvolvimento nuclear e cujo trabalho está ligado a calibração. Essas entrevistas permitiram a obtenção de informações qualitativas sobre processos, recursos, desafios e estratégias de desenvolvimento.

3.4.3 Análise Comparativa

Os dados coletados foram analisados comparativamente, considerando indicadores específicos de cada laboratório e as características particulares da RBC. A triangulação de dados será empregada para garantir a validade e a confiabilidade das comparações, combinando informações obtidas por meio do levantamento documental e das entrevistas. A interpretação dos dados permite identificar padrões, tendências e discrepâncias significativas entre as capacidades da RBC e dos laboratórios internacionais, possibilitando uma análise holística e fundamentada.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo, é apresentada uma análise comparativa dos recursos de calibração disponíveis no Brasil em contraste com aqueles encontrados em países reconhecidos pelo seu domínio na área nuclear. Essa investigação é fundamentada em dados fornecidos pela BIPM, acessados por meio do KCDB, e foi enriquecida por percepções valiosas provenientes de entrevistas realizadas com profissionais vinculados ao PNM, agregando uma dimensão prática e contextual à análise comparativa.

O cerne desta análise reside na avaliação da capacidade da rede brasileira de calibração para contribuir efetivamente para o desenvolvimento da tecnologia nuclear. Por meio da comparação com nações mais avançadas nesse domínio, busca-se identificar lacunas e áreas de aprimoramento para fortalecer os recursos de calibração no Brasil.

4.1 Análise da RBC em um contexto das potências nucleares e expoentes

Conforme exposto anteriormente o KCDB é um banco de dados onde são gerenciados e armazenados as CMCs e as comparações-chaves e suplementares no âmbito global da metrologia, supervisionado pela BIPM. Com base em seus dados, é possível identificar as comparações-chaves e suplementares disponíveis e traçar paralelos entre as

quantidades e as áreas abrangidas pelas CMCs de diversos países e com isso fazer uma análise quantitativa da estrutura brasileira frente às nações de maior desenvolvimento na área nuclear.

De forma a realizar a comparação proposta por este trabalho, foram coletados dados do KCDB referentes ao Brasil, aos Estados Unidos, ao Reino Unido e à França. A coleta de dados abrangeu tanto as comparações chave e suplementares como as CMCs de cada país, com a finalidade de permitir uma análise comparativa quantitativa entre a capacidade brasileira e das referidas potências nucleares mundiais, sendo apresentados na forma de tabelas.

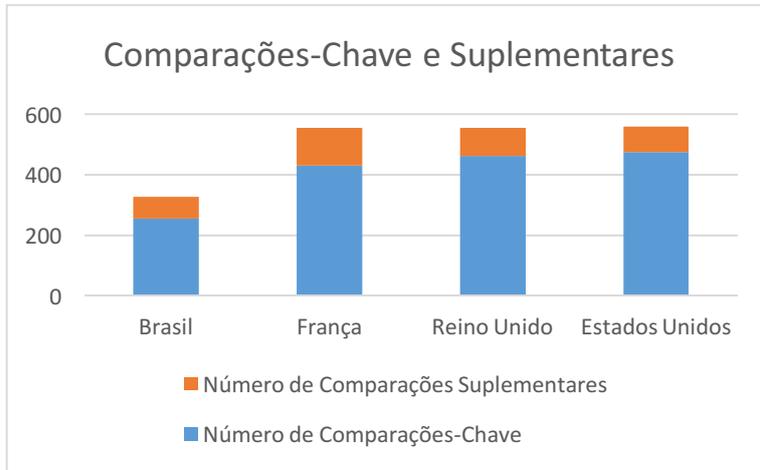
Inicialmente, na Tabela 1, cujos dados foram extraídos do KCDB [19], tem-se a quantidade de comparações-chave e comparações suplementares, sendo que estas são normalmente organizadas pelas Organizações Regionais de Metrologia (RMO) para cobrir necessidades regionais e subsidiárias, e aquelas estabelecem valores de referência para as grandezas de medição. Tais parâmetros garantem que as medições realizadas pelos Institutos Nacionais de Metrologia e validadas por eles sejam confiáveis, precisas e comparáveis internacionalmente, sendo fundamental para o comércio e a indústria internacional para a garantia da qualidade e da segurança, em especial no âmbito nuclear.

Tabela 1 – Comparações-chave por país.

País	Número de Comparações-chave	Número de Comparações suplementares	Total
Brasil	256	71	327
França	430	124	554
Reino Unido	462	93	555
Estados Unidos	475	84	559

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

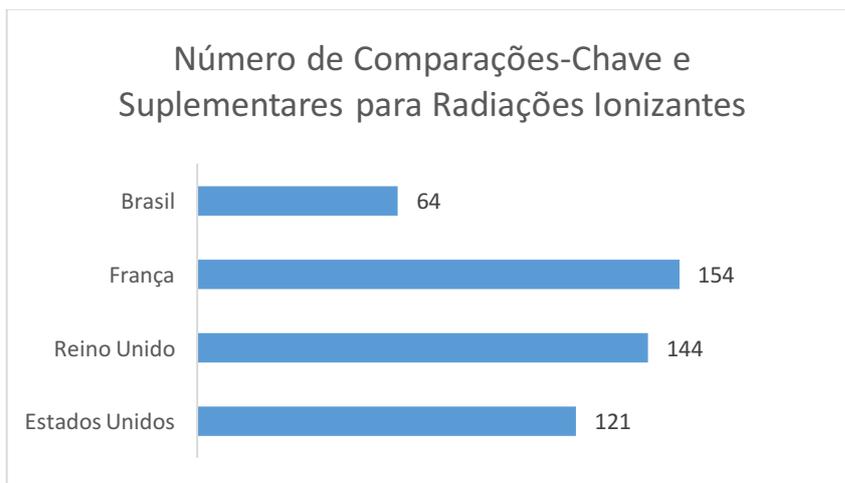
Figura 2 – Gráfico Comparações-Chaves e Suplementares por País



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Constata-se, portanto, que há uma certa disparidade do Brasil para com os países citados, que possuem quase o dobro de comparações-chave e suplementares, o que pode ser verificado na figura 2. Essa diferença se propaga e se intensifica pelas grandezas importantes ao desenvolvimento da tecnologia nuclear. Por exemplo, no que diz respeito à medição de radiação ionizante, grandeza característica e fundamental da área, o Brasil possui 64 comparações-chave e suplementares, enquanto os Estados Unidos possuem 121, o Reino Unido 144 e a França 154, conforme disposto na figura 3.

Figura 3 – Gráfico Comparações-Chaves e Suplementares para Radiações Ionizantes



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A Tabela 2, cujos dados também foram extraídos do KCDB [20], traz as quantidades totais de CMCs por áreas da metrologia dos respectivos países, que fornecem uma medida da competência técnica dos laboratórios nacionais de metrologia em uma determinada área de medição ou calibração, garantindo a confiabilidade e a precisão dos resultados, bem como a conformidade com as normas e regulamentos nacionais e internacionais.

Tabela 2 – Capacidades de Calibração e Medição (CMC) por país.

Área da Metrologia \ País	Acústica, Ultrassom e Vibração	Eletricidade e Magnetismo	Dimensional	Massa e grandezas relacionadas	Fotometria e Radiometria	Termometria	Tempo e Frequência	Química e Biologia	Radiações Ionizantes	Total por país e área da metrologia
Brasil	144	65	27	85	18	11	13	133	141	637
França	51	137	27	105	30	100	19	122	293	884
Reino Unido	13	162	55	45	136	66	12	303	180	972
Estados Unidos	31	325	49	107	94	85	11	216	494	1412
Argentina	14	88	14	73	4	17	9	56	48	323
Uruguai	0	132	1	55	0	27	0	51	0	266

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Quando comparado com países sul-americanos, por exemplo a Argentina que possui 323 CMCs revisados e aprovados pela CIPM MRA ou o Uruguai com 266, o Brasil possui relativo destaque e proeminência [20]. Porém, quando em comparação com as demais nações trazidas por este trabalho, conforme a Tabela 2, uma vez mais se percebe certa defasagem. Tal diferença pode ser evidenciada na área da termometria, visto que a temperatura é uma das principais grandezas a ser medida e controlada em plantas nucleares e o Brasil está consideravelmente atrás dos demais.

Essa disparidade pode ser observada também na quantidade de laboratórios acreditados. Conforme dados fornecidos pelo INMETRO em seu sistema de consulta aos Laboratórios de Calibração Acreditados [21], o Brasil possui hoje 495 laboratórios acreditados nas diversas áreas da metrologia. Diferentemente do Brasil, que possui uma rede atrelada a um instituto nacional, os Estados Unidos possuem 5 grandes instituições de acreditação signatárias da Cooperação Internacional de Acreditação de Laboratórios (ILAC) [22], são elas: Associação Americana para Acreditação de Laboratórios (A2LA), Conselho Nacional de Acreditação ANSI (ANAB), Serviço de Acreditação Internacional (IAS), Programa Nacional Voluntário de Acreditação de Laboratórios (NVLAP) e Laboratório de Acreditação Perry Johnson (PJLA). Essas instituições somam mais de 1200 laboratórios acreditados para a realização de calibração em diversas áreas [22], quase 3 vezes o número de laboratórios da RBC.

4.2 Entrevistas com profissionais vinculados ao PNM

Este tópico se propõe a oferecer uma visão prática e atualizada da estrutura de calibração da Marinha, mais especificamente do PNM, por meio de entrevistas com profissionais vinculados ao programa e cuja atividade tem ligação com esta área, proporcionando uma abordagem mais realista sobre as dinâmicas, desafios e tendências do setor e possibilitando uma análise qualitativa dos recursos que a Marinha dispõe e sua ligação com a RBC. Cumpre acrescentar que as entrevistas foram transcritas por completo no Apêndice deste trabalho, sendo trazidas neste tópico os trechos mais relevantes.

4.2.1 Entrevista com profissionais responsáveis pela calibração no CINA

As duas entrevistas iniciais foram realizadas, primeiramente, com o Chefe do Departamento de Gestão da Qualidade Industrial do Centro Industrial Nuclear de Aramar (CINA) e, em seguida, com o Encarregado da Divisão de Calibração. Em sua estrutura organizacional a Divisão de Calibração encontra-se subordinada ao Departamento de Gestão da Qualidade Industrial do CINA, sendo os responsáveis pela calibração da maioria das grandezas no referido centro industrial.

Ambos os profissionais apontaram para a dificuldade de se calibrar equipamentos ligados às radiações ionizantes. O CINA dispõe de um laboratório próprio para a calibração de equipamentos de medição de radiações ionizantes que está inoperante por falta de técnico licenciado pela CNEN. Além disso, “Quando são monitores de radiação ionizante a dificuldade é que no Brasil existem poucos laboratórios acreditados”, afirma o Chefe do Departamento, tendo em vista que existem apenas 6 laboratórios acreditados pertencentes à RBC, o que pode ser verificado no sistema de consulta aos Laboratórios de Calibração Acreditados [21]. Outra complicação trazida pelos entrevistados diz respeito à calibração de equipamentos contaminados e irradiados, conforme afirma o Encarregado da Divisão: “Hoje a gente não consegue calibrar equipamentos contaminados. [...] ou seja, equipamentos que tiveram contatos com urânio enriquecido ou até com urânio empobrecido”, isso se deve ao fato de que a calibração de equipamentos contaminados necessitaria ou de uma infraestrutura específica e, dependendo da atividade dos materiais radioativos, da utilização de células quentes, ou da obtenção de dois sistemas de padrões de referência, um deles ficando dedicado a materiais

radioativos e outro sem radiação, cada um operando em seus locais específicos para não ter contaminação entre si.

Outra deficiência da RBC que pode ser destacada se dá no que diz respeito aos monitores de área como os detectores de gases. O ciclo do combustível nuclear pode ser associado a presença de gases perigosos, como o ácido fluorídrico (HF) que é utilizado na conversão do urânio para um estado gasoso de forma a permitir o seu enriquecimento, tornando essencial a utilização de equipamentos para a detecção e o controle de liberação desses gases.

Conforme explica o segundo entrevistado, a Divisão de Calibração do CINA atualmente está voltada aos processos e grandezas mais comuns no âmbito da indústria em geral (pressão, temperatura, dimensional), e nesse tipo de serviço, quando necessário, a RBC tem sido capaz de suprir as demandas do PNM. Os laboratórios de calibração do CINA, apesar de possuírem o certificado da ISO 9001, atualmente ainda não são acreditados e não compõem a RBC, porém há a expectativa de que nos próximos anos essa acreditação seja concluída, como explica o Chefe do Departamento:

O CINA possui a Divisão de Calibração, que está em fase de preparação para acreditação nas grandezas pressão, temperatura e dimensional para alguns serviços. É importante destacar que a acreditação ocorre por grandeza e por serviço, ou seja, não há a viabilidade de ser acreditado em “tudo”; não há laboratório que tenha acreditação para todas as grandezas e serviços, lembrando que ainda existe a limitação da CMC. Desta forma, uma pequena parcela sempre necessitará de calibração externa.

Devido a ausência dessa acreditação dos laboratórios, por vezes equipamentos que poderiam ser calibrados internamente precisam ser enviados para laboratórios externos em virtude de haver a necessidade de uma acreditação RBC. Essa obrigação recai sobre os itens importantes a segurança, cuja definição segundo a norma CNEN NN 1.16 [7] compreende tanto as estruturas, sistemas e componentes ligados à possibilidade de exposição de radiação e ocorrência de acidentes quanto os dispositivos necessários para atenuar essas consequências. Essa acreditação se apresenta como uma oportunidade de se agilizar o processo de calibração e retorno do equipamento a sua operação normal, visto que a obtenção e contratação por órgãos e instituições da administração pública, como a Marinha, tende a ser mais demorada.

4.2.2 Entrevista com profissional responsável pela radioproteção do CTMSP

A terceira entrevista foi conduzida com a Encarregada da Divisão de Radioproteção do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e teve como enfoque a calibração de equipamentos responsáveis pela radioproteção das áreas ligadas a atividade nuclear, como

monitores de área, dosímetros eletrônicos e monitores de contaminação, relacionados com a medição de radiações ionizantes.

Para essa área, o INMETRO delegou a responsabilidade pela metrologia ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), uma instituição de pesquisa, desenvolvimento e ensino vinculada à CNEN. Por meio dessa instituição e de seu comitê de avaliação são emitidos os certificados para os laboratórios de calibração desse campo da metrologia. Apesar de serem poucos os laboratórios acreditados para a área, a RBC vem suprindo às necessidades da Divisão de Radioproteção, conforme afirma sua encarregada, sendo hoje o maior parceiro o Energéticas (IPEN) por meio de um contrato de colaboração.

Outro ponto a ser destacado diz respeito à calibração de detectores de nêutrons. Esse tipo de serviço não pode ser realizado pelo laboratório do IPEN e necessita ser enviado à própria IRD, que, segundo a entrevistada, “é o único laboratório no Brasil que fornece esse serviço”. Tais equipamentos são essenciais à operação de plantas nucleares, estando associados ao controle da reatividade de um reator.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal realizar uma análise comparativa dos recursos de calibração disponíveis no Brasil em contraste com aqueles encontrados em países reconhecidos pelo seu domínio na área nuclear. Para isso, foram utilizados dados fornecidos pela BIPM, acessados por meio do KCDB, e enriquecidos por meio de entrevistas realizadas com profissionais vinculados ao PNM.

Apesar de relativo destaque do INMETRO e dos laboratórios brasileiros em nosso entorno geopolítico, foi possível, com base nos resultados obtidos, identificar que o Brasil ainda possui uma capacidade limitada em relação à calibração de instrumentos nucleares quando comparado com países como os Estados Unidos, o Reino Unido e a França. Embora o país tenha avançado significativamente nas últimas décadas, ainda há muito a ser feito para que se possa alcançar um nível de excelência na área.

Áreas como a calibração de equipamentos de medição de radiações ionizantes, inerentes à tecnologia nuclear, ou a capacidade de se trabalhar com material irradiado por meio de células quentes ainda carecem de investimento em pesquisa e desenvolvimento visando elevar o patamar do país frente às demais potências globais.

5.1 Considerações Finais

É importante destacar que a capacidade de um país em relação à tecnologia nuclear não pode ser avaliada exclusivamente com base no número de comparações realizadas ou laboratórios acreditados. Existem diversos outros fatores que influenciam a capacitação de um país nesse sentido, como investimentos em pesquisa e desenvolvimento, recursos humanos qualificados e políticas públicas voltadas para o setor. Dessa forma, é necessário realizar uma análise mais aprofundada para compreender a real capacidade brasileira e das demais potências mundiais em relação à tecnologia nuclear. Os dados apresentados no KCDB da BIPM podem ser um ponto de partida para essa análise, mas não devem ser considerados como uma avaliação completa e definitiva.

Com base nos resultados obtidos, é possível perceber a necessidade de que sejam realizados investimentos em pesquisa e desenvolvimento na área nuclear, com o objetivo de ampliar a capacidade de calibração de instrumentos nucleares no país. Além disso, é fundamental que sejam criadas políticas públicas voltadas para o setor, com o objetivo de incentivar a formação de recursos humanos qualificados e a criação de laboratórios de especializados na área.

Nesse contexto a Marinha tem a possibilidade de assumir um papel de destaque como um dos líderes no desenvolvimento nuclear no país. A acreditação dos laboratórios da Marinha perante o INMETRO é o primeiro passo e pode no futuro vir a ser uma porta para a colaboração e o fornecimento de serviços por essa força à comunidade civil.

A indústria nuclear, após passar por um período de desvalorização em virtude do acontecido em *Fukushima* em 2011, vem se reaquecendo, podendo ser uma oportunidade de mercado para que o Brasil busque um maior destaque, visto que o país possui uma das 7 maiores reservas de urânio do mundo, mesmo com grande parte do território ainda não prospectado, cerca de 70%, o que o coloca como um dos fortes candidatos a assumir protagonismo nessa área.

Por fim, é importante destacar que a calibração de instrumentos nucleares é uma área de extrema importância para a segurança e o desenvolvimento da tecnologia nuclear, sendo fundamental que sejam realizados investimentos contínuos na área, com o objetivo de garantir a excelência na calibração de instrumentos nucleares e a segurança em indústrias nucleares em todo o mundo.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizados estudos mais aprofundados sobre a capacidade de calibração de instrumentos nucleares em outros países, com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre as melhores práticas e tecnologias disponíveis na área. Além disso, é fundamental que sejam realizados estudos sobre a aplicação da calibração de instrumentos nucleares em diferentes setores, como a medicina nuclear e a indústria de energia nuclear, com o objetivo de compreender melhor as necessidades específicas de cada área e desenvolver soluções mais eficientes e seguras.

Outra sugestão para trabalhos futuros é a realização de estudos sobre a aplicação de tecnologias emergentes, como a inteligência artificial e a internet das coisas, na calibração de instrumentos nucleares. Essas tecnologias podem trazer benefícios significativos para a área, como a automação de processos e a redução de erros humanos, e devem ser exploradas com mais profundidade.

REFERÊNCIAS

- [1] PATTI, C; **O Programa Nuclear Brasileiro: Uma história oral**; 1. Ed; Rio de Janeiro: Editora Fundação Getulio Vargas, 2014; *E-book*.
- [2] FERNANDES, W. D.; NETO, P. L. O. C.; DA SILVA, J. R; Metrologia e Qualidade – Sua importância como fatores de competitividade nos processos produtivos; **Encontro Nacional de Engenharia de Produção 2009**. Disponível em <https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_sto_091_615_13247.pdf>; Acesso em: 4 de outubro de 2023.
- [3] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA; **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**; Duque de Caxias, 2012; Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>; Acesso em: 5 de outubro de 2023.
- [4] INTRODUÇÃO; 20 ago. 2020; Disponível em <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/metrologia-cientifica/laboratorios-de-metrologia-do-inmetro/introducao>>; Acesso em: 4 de outubro de 2023.
- [5] *BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES; Calibration and measurement capabilities in the 34th text of the CIPM MRA*; Disponível em <<https://www.bipm.org/documents/20126/43742162/CIPM-MRA-G-13.pdf/f8b8c429-42e0-4cf1-dc6c-bc60ab7f371a>>; Acesso em: 6 de outubro de 2023.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **NBR ISO 9001: Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos**; Rio de Janeiro, out., 2015.
- [7] BRASIL; Lei nº 14222, de 15 de outubro de 2021; Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear; **Diário Oficial da União**, 18 de outubro de 2021; Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14222.htm#:~:text=Cria%20a%20Autoridade%20Nacional%20de,de%207%20de%20janeiro%20de>; Acesso em: 9 de outubro de 2023.
- [8] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR; **CNEN NN 1.16: Garantia da qualidade para a segurança de usinas nucleoeletricas e outras instalações**; 2000; Disponível em <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm116.pdf>>; Acesso em: 10 de outubro de 2023.
- [9] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA; **Laboratórios de Calibração Acreditados – Rede Brasileira de Calibração – RBC**; Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/labRBC.asp>>; Acesso em: 10 de outubro de 2023.

- [10] CEIME; **RBC – Rede Brasileira de Calibração – Calibração Ceime**; Disponível em <<https://www.calibracaoceime.com.br/2013/08/rbc-rbc-rede-brasileira-de-calibracao-criada-em-1980-e-constituída-por-laboratorios-credenciados-pelo-inmetro-segundo-os-requisitos-da-norma-nbr-isoiec-17025-a-rbc-congrega-competencias-tecn/#:~:text=Criada%20em%201980%20e%20constituída,realização%20de%20serviços%20de%20calibração>>; Acesso em: 10 de outubro de 2023.
- [11] LG METROLOGIA; **Você sabe a diferença entre calibração RBC e calibração RASTREADA?**; Disponível em <<https://lgmetrologia.com.br/2020/07/08/voce-sabe-a-diferenca-entre-calibracao-rbc-e-calibracao-rastreada/#:~:text=Na%20CALIBRAÇÃO%20RBC%20o%20certificado,e%20padrões%20primários%20de%20referência>>; Acesso em: 11 de outubro de 2023.
- [12] CONAUT; **Confiabilidade da Medição de Vazão**; Disponível em <<https://www.conaut.com.br/blog/100-confiabilidade-da-medicao-de-vazao>>; Acesso em: 11 de outubro de 2023.
- [13] *INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; Safety of Nuclear Power Plants: Design*; Vienna, 2016; Disponível em <<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1715web-46541668.pdf>>; Acesso em: 12 de outubro de 2023.
- [14] CASSIOLATO, C; **Medição de Pressão: Características, Tecnologias e Tendências**; Disponível em <<https://www.smar.com/pt/artigo-tecnico/medicao-de-pessao-caracteristicas-tecnologias-e-tendencias>>; Acesso em: 11 de outubro de 2023.
- [15] *INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; Reactor status reports – In Operation & Suspended Operation – By Type*; Disponível em <<https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>>; Acesso em 19 de outubro de 2023.
- [16] CASSIOLATO, C.; ALVES, E. O; **Medição de Vazão**; Disponível em <<https://www.profibus.org.br/images/arquivo/pdf-2-543ec3eeb4df5.pdf>>. Acesso em: 12 de outubro de 2023.
- [17] **Variáveis dos Processos Industriais**; 27 de junho de 2020; Disponível em <<https://valoresnorana.com/instrumentacao-industriais-variaveis/>>; Acesso em: 13 de outubro de 2023.
- [18] LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES; **Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante (Recomendações e definições)**; Disponível em <<http://antigo.ird.gov.br/index.php/material-didatico/send/8-material-didatico/9-radioprotecao-e-dosimetria-fundamentos>>; Acesso em: 14 de outubro de 2023.

- [19] *BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES; Number of key and supplementary comparisons by country*; Disponível em <<https://www.bipm.org/kcdb/comparison/statistics/more>>; Acesso em: 16 de out. 2023.
- [20] *BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES; CMC statistics by country*; Disponível em <<https://www.bipm.org/kcdb/cmc/statistics/public>>; Acesso em: 16 de outubro de 2023.
- [21] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA; **Lista de laboratórios**; Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/lista_laboratorios.asp>; Acesso em: 16 de outubro de 2023.
- [22] *INTERNATIONAL LABORATORY ACCREDITATION COOPERATION; Signatory Search International Laboratory Accreditation Cooperation*; Disponível em <<https://ilac.org/signatory-search/>>; Acesso em: 16 de outubro de 2023.

APÊNDICE - Entrevistas transcritas

Entrevista nº 1 - Chefe do Departamento de Gestão da Qualidade Industrial do CINA

1. Quais as maiores dificuldades encontradas para realizar a calibração de instrumentos afetos a área nuclear?

Na verdade, instrumentos utilizados na área nuclear não tem diferenciação em relação a instrumentos aplicados em outros processos. Quando são monitores de radiação ionizante a dificuldade é que no Brasil existem poucos laboratórios acreditados. Para instrumentos de processo eu diria que a maior preocupação é para os casos em que não é possível a descontaminação, pois nesse caso os padrões utilizados também serão contaminados, o que jamais pode acontecer.

2. Quais equipamentos, grandezas e faixas que hoje não são contemplados pela RBC no setor nuclear? Como se faz nesta situação? Há necessidade de contratar serviços no exterior?

Até hoje só me deparei com um tipo instrumento que não há laboratório acreditado no Brasil, que são monitores de área, detectores de gás HF. Importante dizer que a necessidade de se calibrar no exterior seria uma solução extrema, ou seja, necessária somente para padrões de referência dos laboratórios de calibração. Para instrumentos de processo podem ser calibrados em laboratórios internos, desde que tenha a competência necessária.

3. A Marinha dispõe de laboratórios de calibração? Eles se enquadram nos requisitos da RBC? Como tais laboratórios podem ser utilizados, ou já estão sendo utilizados, para contribuir com o desenvolvimento da área nuclear no país?

O CINA possui a Divisão de Calibração, que está em fase de preparação para acreditação nas grandezas pressão, temperatura e dimensional para alguns serviços. É importante destacar que a acreditação ocorre por grandeza e por serviço, ou seja, não há a viabilidade de ser acreditado em "tudo"; não há laboratório que tenha acreditação para todas as grandezas e serviços, lembrando que ainda existe a limitação da CMC. Desta forma, uma pequena parcela sempre necessitará de calibração externa.

4. Dentre as principais grandezas de uma planta nuclear (pressão, vazão, nível, temperatura e radiação) quais delas apresentam uma maior dificuldade em se encontrar prestadores de serviço tanto no Brasil ou exterior?

Radiação ionizante, pois possui número restrito de laboratórios acreditados. Mas é importante destacar que dentre as grandezas listadas é a que possui menor quantidade de equipamentos.

5. Há alguma outra grandeza a ser medida que necessite de calibração e que se apresente como possível barreira ao desenvolvimento da indústria nuclear no Brasil?

Algumas grandezas possuem menor número de laboratórios acreditados, no entanto não chegam a ser uma barreira para o desenvolvimento nuclear. É de grande relevância que a Marinha continue investindo na estruturação de laboratório interno, como no caso da Divisão de Calibração, para que as necessidades sejam supridas internamente na máxima extensão possível.

Entrevista nº 2 - Encarregado da Divisão de Calibração do CINA

1. Quais as maiores dificuldades encontradas para realizar a calibração de instrumentos no CINA?

Com relação à realização das atividades em si, a falta de padrões, hoje é uma dificuldade. A gente está planejando adquirir mais padrões, padrões mais precisos, pra gente conseguir atender melhor o programa. Para atender a gente aqui, do que a gente já atende, a gente já tem os padrões, ainda faltam um ou outro. Mas faltam padrões, por exemplo, a gente tá com um padrão fora, que é o ISOCAL. Ele é um multicalibrador, então ele calibra várias coisas. Então, para você fazer uma calibração numa planta, é muito melhor você levar ele. Então, a gente precisa de mais um desses. Mas a gente também precisa, por exemplo, para a área de temperatura para estender a nossa faixa, para atender totalmente aqui o CINA, a gente hoje está de menos 20 a 600 graus. Então, a gente precisa de outros padrões para estender isso aqui, para menos 50 e para 1300 graus. E hoje a gente não consegue calibrar equipamentos contaminados. Então é um dos nossos planos adquirir padrões para fazer calibração de equipamentos contaminados, ou seja, equipamentos que tiveram contatos com urânio enriquecido ou até com urânio empobrecido. A gente não faz, porque a gente tem poucos padrões e isso contaminaria nossos padrões e a gente não poderia fazer o resto das calibrações.

2. A RBC tem conseguido atender as demandas de serviços e a necessidade de materiais que a Divisão de Calibração possa vir a necessitar?

Sim, para as nossas necessidades conseguem. A gente consegue tudo, praticamente, que a gente precisa adquirir, a gente consegue adquirir no Brasil, os das nossas áreas, que é praticamente industrial. Isso porque a gente não estamos falando de calibração de radiação ionizante. Aí eu já não posso te falar muita coisa, pois é um outro setor, é um outro departamento, é o departamento de radioproteção. Eles também têm um laboratório o LMRI, Laboratório de Metrologia de Radiações Ionizantes, só que hoje não tem ninguém trabalhando nele. Então eu não sei como que o pessoal está fazendo. Provavelmente o pessoal está mandando tudo para fora, para calibração. Mas a gente tem equipamentos muito bons lá, certificados.

3. Hoje os laboratórios que o CINA dispões não possuem a acreditação RBC, correto? São apenas rastreados?

Sim, são apenas rastreados. Dão certificado de rastreados, A parte de calibração de equipamentos de pressão já está praticamente pronta pra acreditar. A gente precisa do ensaio de proficiência, que já está contratado. Aliás, era para ter feito esse mês, mas o pessoal não mandou os artefatos para gente. Além da pressão outras áreas já estão com o teste contratado também, Temperatura e dimensional. Então, em um curto, médio prazo, a princípio, ano que vem, a gente conseguiria acreditar alguns serviços nessas três grandezas. Mas a intenção não é abrir esses laboratórios para público externo, é só no âmbito Marinha. Hoje, a gente só consegue atender a nossa necessidade, basicamente, o CTMSP e o CINA, na área do projeto nuclear.

4. Dentre as grandezas que vocês trabalham aqui na Divisão de Calibração, qual é aquela que traz mais dificuldade?

A que temos menos padrões é a Elétrica. Hoje, eu tenho um nível legal de padrões de pressão, de temperatura. O dimensional está tranquilo. É um e outro que não fazemos. Massa, a gente tem até 2.500 kg que a gente consegue fazer. Torque até 5.000 N.m. O elétrico é que me faltam padrões.

5. Dentre as grandezas que vocês trabalham aqui qual você acredita que sejam as mais críticas para a continuidade do programa?

Pra gente, ainda hoje, as mais críticas são temperatura e pressão. São as mais utilizadas, que representam a maior quantidade de instrumentos. O lado bom é que são as duas primeiras que a gente vai ser acreditado. Essas duas mais a dimensional. A norma da CNEN em si não pede que as calibrações sejam realizadas na rede RBC. Ela pede que sejam realizadas periodicamente, trazendo obrigações mais gerais. Essa obrigatoriedade de se calibrar em laboratórios acreditados todos os itens importantes à segurança se dá pelo Sistema de Garantia da Qualidade, do CTMSP, que pede que a calibração dos itens importantes à segurança sejam RBC. Os demais, eles podem ser rastreados. O que vai ser bom da gente ser acreditado é que esse processo de aquisição hoje é muito lento, processo de obtenção e contratação. Demora nove meses a um ano e dois meses, coisa assim. Então, a gente sendo acreditado, a gente não vai ter esse tempo a mais aí de espera, na prática. É, porque hoje o que a gente faz aqui, do pedido a um instrumento calibrado, dependendo do nosso fluxo aqui, não demora mais do que um mês. Mais ainda tem coisas que a gente não consegue. Gases, por exemplo, ainda não tá no nosso escopo. Físico-química ainda não tá no nosso escopo. Não sei se a gente vai para esse lado. Hoje a nossa preocupação é industrial.

Entrevista nº 3 - Encarregada da Divisão de Radioproteção do CTMSP

1. Maiores dificuldades encontradas para realizar a calibração de instrumentos de radiação ionizante?

Há uma relação dos laboratórios, certificados pelo CASEC/IRD (Comissão de Avaliação de Serviços de Ensaio e de Calibração) são públicos e em outros estados, com exceção da Metrobrás, que é no interior de SP e privada. Nossos equipamentos são calibrados no IPEN, e a grande dificuldade que temos é com relação à agenda de calibração (muitas vezes não encontramos datas) e ao prazo que nos é dado para a calibração. Com relação à Metrobrás, a grande dificuldade é com relação à distância do Laboratório, que fica em Jardinópolis, interior de SP, e devemos pagar pela calibração. Muitas vezes não se tem a verba necessária para que isso ocorra e falta de motoristas para levar os equipamentos para a empresa, os funcionários da Radioproteção que acabam levando e buscando os equipamentos. Ultimamente, o IPEN tem suprido a nossa necessidade para equipamentos calibrados, tanto com relação aos monitores de área, câmaras de ionização, quanto aos dosímetros eletrônicos e monitores de contaminação. Temos um acordo de cooperação com o IPEN, e não temos nenhuma despesa.

2. Algum dos serviços necessários aos equipamentos não são contemplados pela RBC? Como se faz nesta situação? Há necessidade de contratar serviços no exterior?

Todos os serviços são contemplados pela RBC. Até hoje não foram enviados monitores de radiação para calibração no exterior.

3. A Marinha dispõe de laboratórios de calibração desse tipo de equipamento? Eles se enquadram nos requisitos da RBC?

Atualmente a Marinha não dispõe de um laboratório de calibração de instrumentos acreditado. Temos em Aramar, um laboratório de calibração de instrumentos, mas ainda não é acreditado pelo CASEC/IRD. Temos um irradiador com uma fonte de Cs-137 de 30 Ci para a calibração de monitores de taxa de exposição, câmaras de ionização, de área e dosímetros eletrônicos.

4. Quando mandam equipamentos para fora, tem algum laboratório que se destaca como parceiro?

Os únicos detectores que são calibrados no IRD são os detectores de nêutrons, pois é o único laboratório no Brasil que fornece esse serviço.