

**EDITAL INTERNO Oportunidade de Nucleação de novos Projetos de Pesquisa – DPDE/IPEN Nº 4/2017**

**Título do projeto de pesquisa: Montagem de um sistema de medição absoluta da atividade de radionuclídeos baseado no método TDCR (Triple-to-double coincidence ratio)**

**Coordenadora: Dra. Denise Simões Moreira**

**Equipe técnica: Dr. Mauro da Silva Dias**

**Dra. Marina Fallone Koskinas**

**Dr. Franco Brancaccio**

**Dr. Renato Semmler**

**MSc. Roberto Mauro Schoueri**

**MSc. Fábio Toledo**

**Téc. Oswaldo C. Alípio**

**Laboratório de Metrologia Nuclear**

**Centro do Reator de Pesquisas**

## Introdução

Embora a técnica de cintilação líquida já fosse conhecida por volta de 1950, os detectores de radiação baseados nesta técnica só passaram a ser gradativamente utilizados a partir dos anos 1980, aplicados em diversas áreas como engenharia, agronomia, artes, medicina etc.

Inicialmente utilizados como um método de medida relativo, com a necessidade de calibração com fontes padrão, detectores baseados em cintilação líquida passaram a integrar o seleto grupo dos sistemas de medida absoluta da metrologia de radionuclídeos com o desenvolvimento da técnica conhecida como *Triple-to-Double Coincidence Ratio* ou, simplesmente, TDCR [Pochwalski and Radoszewski, 1979].

Na 21ª edição do *International Conference on Radionuclide Metrology* (ICRM 2017), o principal congresso da área, realizado recentemente, de 15 a 19 de maio de 2017, muitos trabalhos foram apresentados mostrando o aprimoramento contínuo do método TDCR e revelando que grande parte dos laboratórios internacionais já possui o seu próprio sistema. Foi, inclusive, apresentado a título de curiosidade, um protótipo de um mini módulo central do sistema criado por impressora 3D, além de um mini sistema TDCR completo, que poderia ser facilmente transportado para uma comparação internacional de medição, por exemplo.

Já existem até sistemas comerciais [HIDEX, 2009] que utilizam a técnica TDCR para medidas de rotina, como as feitas em clínicas de medicina nuclear, mas são sistemas caros e não adequados para as aplicações em metrologia de radionuclídeos, como as padronizações.

Entre os anos de 2012 e 2013, em uma viagem de treinamento de seis meses ao *National Institute of Standards and Technology* (NIST, USA), foi possível conhecer melhor o modo de preparação de fontes, medição e análise de dados do TDCR, tornando possível o desenvolvimento de um projeto para, finalmente, adequar o Laboratório de Metrologia Nuclear

(LMN) do IPEN a este momento da cintilação líquida dentro da metrologia nuclear mundial.

O LMN tem uma grande experiência no desenvolvimento de técnicas de medição e análise de dados, acompanhando o desenvolvimento da metrologia nuclear de laboratórios de destaque internacionais. Dentre os trabalhos mais recentes podemos destacar programas para ajustes lineares e não lineares de dados experimentais com análise de incertezas com covariâncias [Dias, M.S., 1997 e 1999]; programas para simulação, pelo método de Monte Carlo utilizando o código MCNP [ORNL, 2006], do sistema de medida de coincidências  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  [Dias et al, 2013] e do sistema de espectrometria gama com detector de germânio; programas para cálculo e correção do efeito soma em espectrometria gama [Takeda, 2002]; sistema de coincidência por software [Dias et al, 2014].

## **Objetivos**

O principal objetivo deste projeto é a construção de um sistema de medição absoluta da atividade de radionuclídeos, baseado em utilização de cintilação líquida aplicada ao método TDCR.

Atingido este objetivo, o LMN estará, finalmente, se adequando ao momento atual dos demais laboratórios de metrologia de radionuclídeos nacionais e internacionais, que já utilizam a cintilação líquida como seu principal método de detecção e contagem da radiação beta e alfa.

## Metodologia

### 1. Cintilação Líquida

A técnica de medida por cintilação líquida é uma das mais sensíveis e versáteis para detecção e quantificação da radioatividade, principalmente para medida de emissores alfa e beta, apresentando muitas vantagens. Entre elas, podemos destacar sua alta eficiência de detecção, uma vez que a solução radioativa é dissolvida diretamente na solução cintiladora [ANNUNZIATA, 2003], simplicidade na preparação das amostras e capacidade de analisar simultaneamente diferentes radionuclídeos.

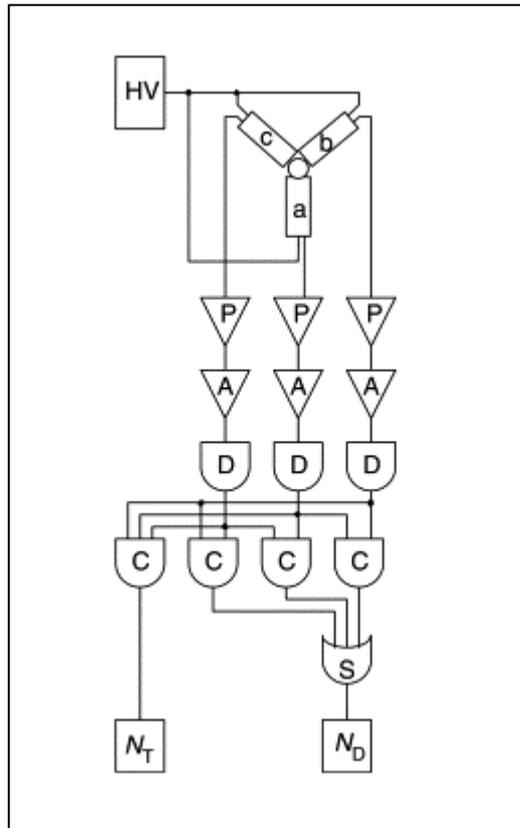
Cintiladores líquidos são normalmente compostos de um solvente orgânico e de um ou mais solutos fluorescentes. Na preparação de amostras para contadores de cintilação líquida, o material radioativo é colocado no composto e exaustivamente misturado, formando o coquetel cintilador. A energia emitida é transferida para o solvente por ionização e excitação, sendo em seguida transferida para o soluto que irá reemitir-la como fótons com comprimento de onda na faixa ultravioleta e violeta [BIPM, 1980].

Estes fótons, tendo um comprimento de onda médio característico do soluto, podem ser detectados no fotocátodo de uma ou mais fotomultiplicadoras. Após a multiplicação dos fótons, o sinal é enviado a um amplificador e finalmente registrado em um contador ou multicanal.

As medidas num contador de cintilação líquida são atualmente feitas pela análise do espectro de energia. No entanto, algumas interferências ocorrem, as quais devem ser corrigidas, pois alteram a eficiência total deslocando o espectro de energia medido para valores mais baixos. Esta interferência é denominada "quenching", termo este usado para descrever vários processos físicos ou químicos que reduzem a saída de luz do cintilador.

## 2. Método *Triple-to-Double Coincidence Ratio* (TDCR)

O método TDCR utiliza três tubos fotomultiplicadores alinhados em um ângulo de 120°, sendo coletadas as coincidências duplas e triplas entre os três tubos fotomultiplicadores, de acordo com o esquema da Figura 1 [Broda, 2003; Broda et al, 2007].



**Fig. 1:** Esquema do sistema TDCR, com três fotomultiplicadoras posicionadas com ângulo de 120 graus entre elas e contendo o frasco com o coquetel cintilador (líquido cintilador + solução radioativa) no centro do conjunto.

HV - alta tensão;

P - pré-amplificador;

A - amplificador;

D - discriminador;

C - coincidência;

S - somador;

N - contador.

As taxas de contagem duplas para os três pares são  $N_{AB}$ ,  $N_{BC}$  e  $N_{AC}$  e  $N_D$  e  $N_T$  são as somas lógicas das taxa de contagem dupla e tripla, respectivamente. A relação aritmética entre estas taxas de contagem é dada por [Kossert, 2015]:

$$N_D = N_{AB} + N_{BC} + N_{AC} - 2N_T \quad (1)$$

As taxas de coincidência dupla e tripla são definidas como:

$$N_D = N_0 \epsilon_D \quad (2)$$

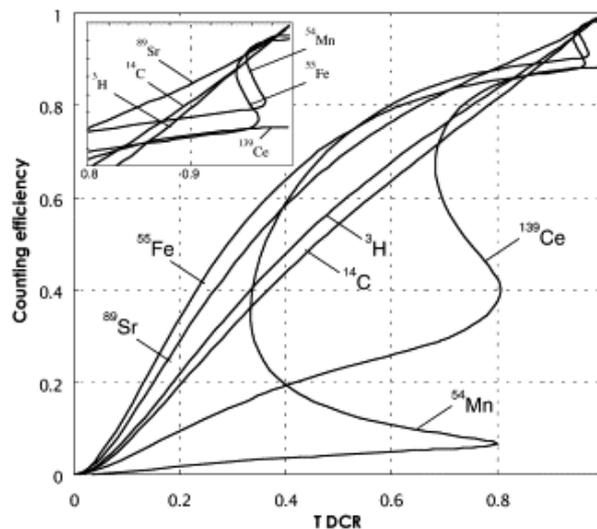
$$N_T = N_0 \varepsilon_T \quad (3)$$

onde  $\varepsilon_D$  e  $\varepsilon_T$  são eficiências duplas e triplas e  $N_0$  é a atividade.

Para um grande número de eventos detectados, a razão das taxas de coincidência tripla para taxa de coincidência duplas  $N_T/N_D$  converge para a razão das eficiências de contagem, esta taxa é denominada eficiência TDCR:

$$N_T/N_D = \varepsilon_{TDCR} \quad (4)$$

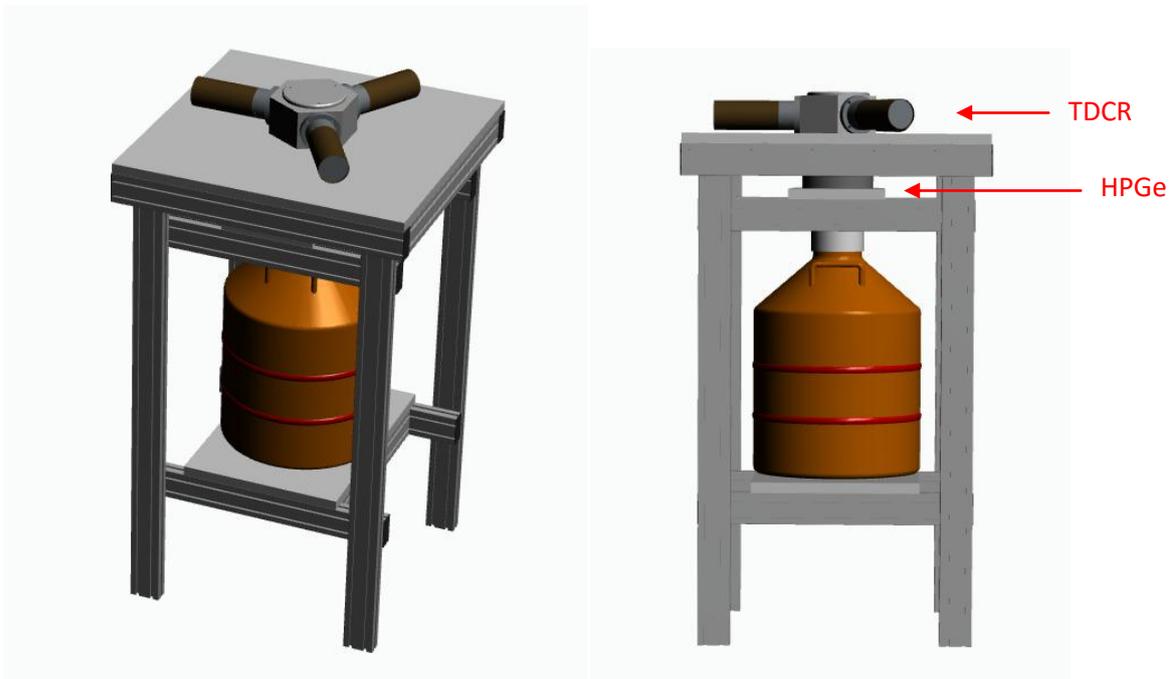
Obtidas as taxas de contagem, os dados podem ser analisados por programas como o código TDCR07c, do *Laboratoire National Henri Becquerel* (LNHB, França), ou o código MICELLE2 [Kossert e Carles, 2010], obtendo-se um gráfico que relaciona o valor experimental do TDCR com a eficiência de contagem, permitindo que se calcule a atividade do radionuclídeo em estudo. Esta relação difere bastante entre os radionuclídeos, como exemplificado na Figura 2 [Broda, 2003].



**Fig. 2.** Eficiência de contagem em função do TDCR para alguns radionuclídeos emissores beta e captura eletrônica [Broda, 2003].

### 3. Montagem do sistema de medição

A Figura 3 mostra o desenho do sistema TDCR em coincidências com um detector de germânio hiperpuro (HPGe) que o LMN pretende montar futuramente, iniciando-se com este projeto. Nos desenhos não foram colocados os pré-amplificadores e demais módulos eletrônicos necessários para o funcionamento do sistema.

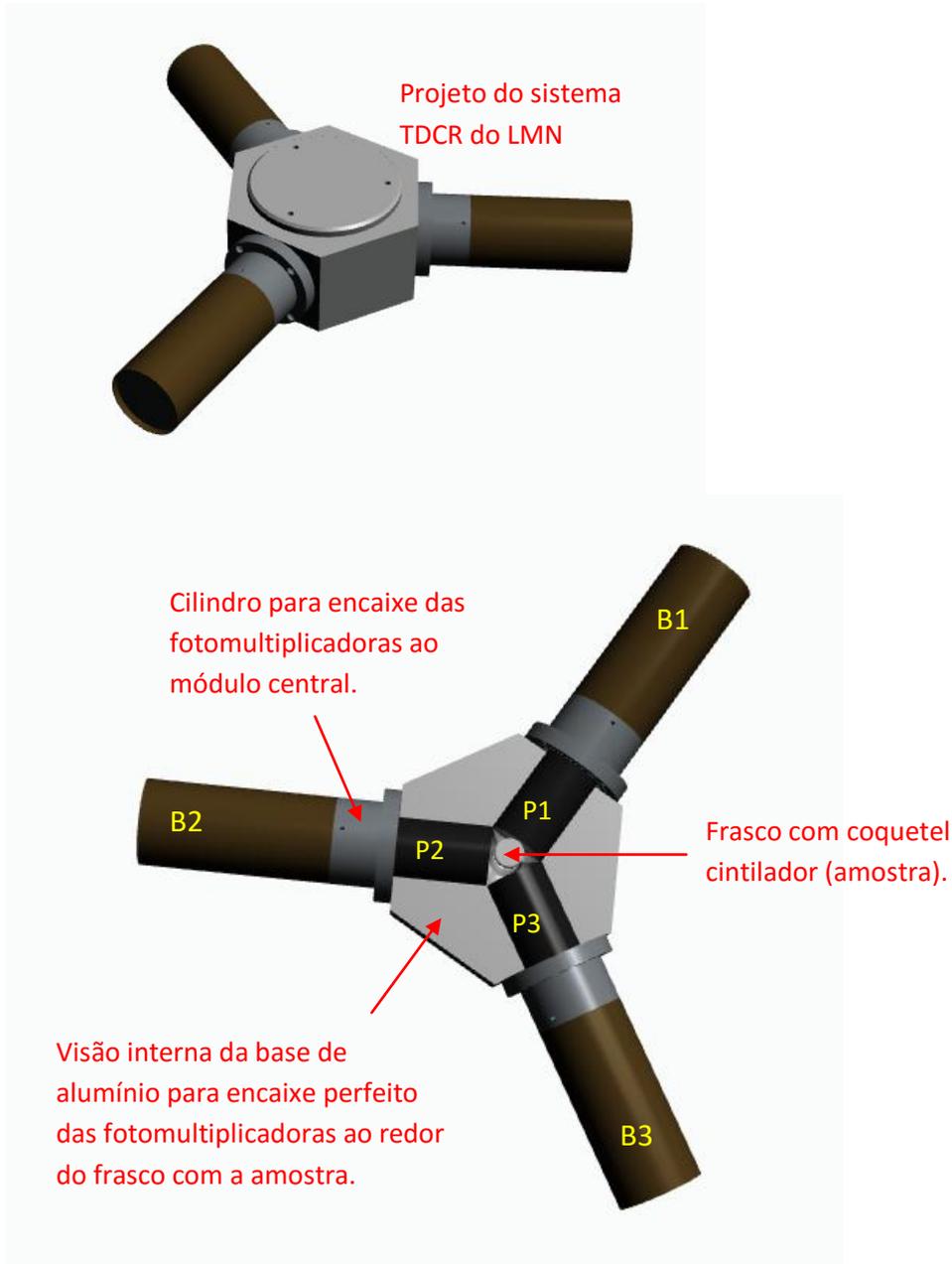


**Fig. 3:** Idealização do projeto final do futuro sistema de coincidências com cintilação líquida do LMN, com o sistema TDCR sobre espectrômetro de HPGe.

Na Figura 4, podem-se visualizar melhor alguns detalhes do sistema de cintilação líquida com três fotomultiplicadoras, para o método TDCR, a ser construído.

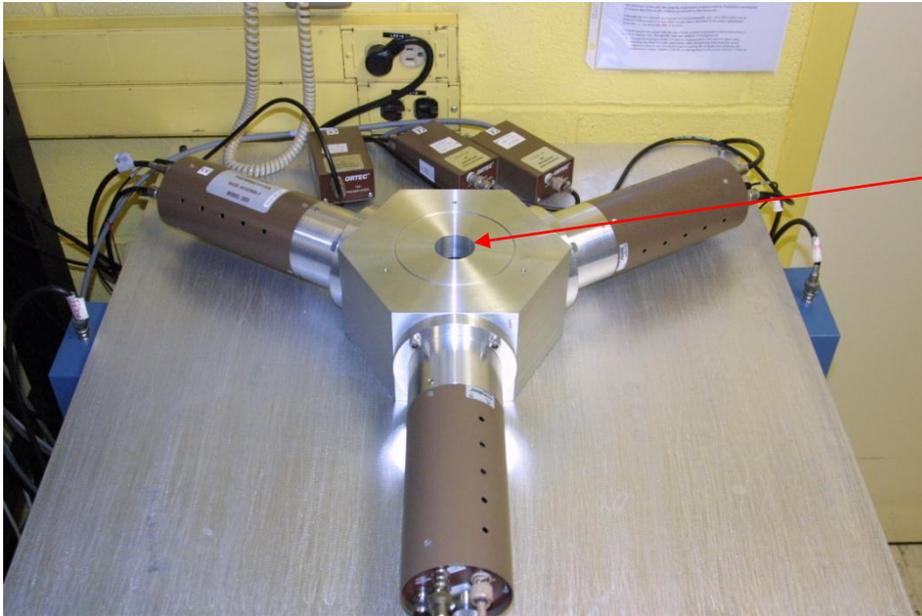
O módulo central é formado por duas partes hexagonais de alumínio, torneadas para ter os três berços dimensionados com precisão para o encaixe das fotomultiplicadoras, posicionadas em ângulo de  $120^\circ$  entre elas, e com o centro da peça em formato esférico e pintado com tinta reflexiva. O encaixe das duas partes é feito com parafusos.

Também existem três módulos laterais para o encaixe das bases das fotomultiplicadoras, parafusados ao módulo central e com vedação de anéis de borracha contra a entrada de luz.



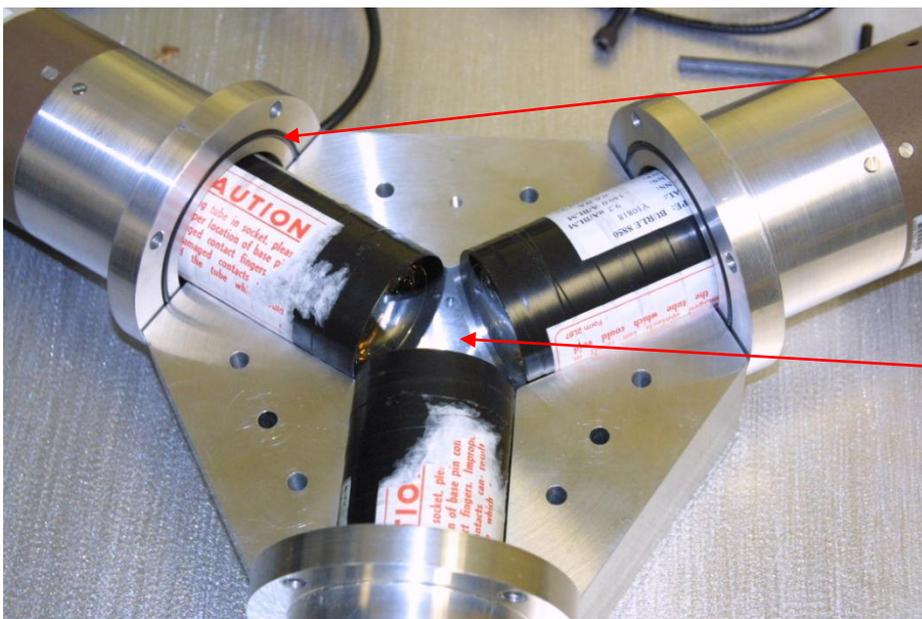
**Fig. 4:** Desenho inicial do projeto para confecção da base de alumínio e dos três cilindros de encaixe das fotomultiplicadoras P1, P2 e P3. Em todos os pontos de acoplamento é feita vedação com anéis de borracha para impedir a entrada de luz. B1, B2 e B3 são as bases para as fotomultiplicadoras.

O modelo escolhido é semelhante ao do laboratório de radionuclídeos do NIST, mostrado na Figura 5, por ter uma ótima vedação contra a entrada de luz e perfeito encaixe de três fotomultiplicadoras.



Local para o frasco com coquetel cintilador

(a)



Anel de borracha para vedação contra entrada de luz.

Centro da peça em formato esférico.

(b)

**Fig 5.** Sistema TDCR do NIST, fotografado em visita ao local no ano de 2013. A foto (a) mostra o sistema fechado, apenas sem a tampa superior. A foto (b) mostra a parte de baixo do módulo central.

Em um primeiro momento, o sistema será montado de forma a se obter os sinais das fotomultiplicadoras de modo analógico, utilizando-se módulos eletrônicos de amplificação, soma, discriminação, coincidência e contagem de pulsos convencionais, já existentes no LMN.

No segundo ano do projeto, serão adquiridos e montados os módulos para digitalização dos sinais, permitindo o registro de informações como altura de pulso e instante de ocorrência de todos os sinais advindos das três fotomultiplicadoras. Com este arquivo de dados, a análise dos mesmos é feita após a medição, sendo as coincidências determinadas por *software*, do modo semelhante ao sistema de coincidências por software (SCS) já montado e em operação no LMN [Dias et al, 2014].

## **Principais contribuições científicas ou tecnológicas da proposta**

O desenvolvimento deste projeto contribui para a melhoria da tecnologia utilizada em pesquisa no IPEN, proporcionando ao LMN a possibilidade de se igualar aos melhores laboratórios de metrologia de radionuclídeos do mundo.

Cientificamente, este projeto possibilita ao LMN do IPEN trabalhar com cintilação líquida e desenvolver, por exemplo, padronizações e determinações de parâmetros nucleares com melhor precisão, além do ganho para toda a equipe com o conhecimento adquirido na montagem do sistema e testes de validação.

## Orçamento detalhado

Tabela 1: Equipamentos/materiais necessários para a realização do projeto.

Item	Qtde	Item	Fabricante/Fornecedor	Valor unitário			Valor total		
				US \$	€	RS\$	US \$	€	RS\$
1	3	Fotomultiplicadora R329-02	Hamamatsu	943,00	-	-	2829,00	-	-
2	1	N6751 – 4 Ch. 10 bit 1 GS/s Digitizer: 3.6/1.8MS/ch, EP3C16, SE	CAEN	-	4660,00	-	-	4660,00	-
3	1	Kit com 8 cabos MCX/BNC WA659K8AAAA A659 KIT8 - 8 MCX TO BNC Cable Adapter	CAEN	-	1200,00	-	-	1200,00	-
4	1	Serviço de torno para confecção do bloco central sextavado em alumínio e de três módulos laterais para encaixe das fotomultiplicadoras.	A ser definido.	-	-	15000,00	-	-	15000,00
5	1	Serviço de confecção de anéis de vedação de borracha.	A ser definido.	-	-	1000,00	-	-	1000,00
6	1	Serviço de confecção da mesa de apoio do sistema.	A ser definido.	-	-	1500,00	-	-	1500,00
7	1 ml	Solução calibrada de $^{14}\text{C}$ com atividade de 100 uCi	Eckert Ziegler	990,00	-	-	990,00	-	-
8	1 ml	Solução calibrada de $^{134}\text{Cs}$ com atividade de 100 uCi	Eckert Ziegler	2565,00	-	-	2565,00	-	-

9	1 ml	Solução de <sup>152</sup> Eu com atividade de 2 mCi	Eckert Ziegler	2750,00	-	-	2750,00	-	-
10	1 ml	Solução calibrada de <sup>55</sup> Fe com atividade de 100 uCi	Eckert Ziegler	1220,00	-	-	1220,00	-	-
11	1 ml	Solução calibrada de <sup>54</sup> Mn com atividade de 100 uCi	Eckert Ziegler	1535,00	-	-	1535,00	-	-
12	1 ml	Solução calibrada de <sup>204</sup> Tl com atividade de 100 uCi	Eckert Ziegler	2200,00	-	-	2200,00	-	-
13	1 ml	Solução calibrada de <sup>88</sup> Y com atividade de 100 uCi	Eckert Ziegler	1860,00	-	-	1860,00	-	-

Tabela 2. Custo total para a realização do projeto.

		<b>Valor da moeda em maio/2017</b>	<b>Valor em R\$</b>
Compras em US\$	15949,00	3,3	52631,70
Compras em €	5860,00	3,7	21682,00
Compras em R\$	17500,00	1	17500,00

<b>Subtotal em R\$</b>	<b>91813,70</b>
<b>10% para taxa de importação</b>	<b>9181,37</b>
<b>Total em R\$</b>	<b>100995,07</b>

### Justificativa para as novas aquisições:

Item	Justificativa
1	Para detecção das cintilações.
2 e 3	Módulos eletrônicos para leitura, digitalização e registro dos sinais das fotomultiplicadoras.
4	O bloco de alumínio usinado permite o posicionamento perfeito das fotomultiplicadoras com ângulo de 120° entre elas sem que se movimentem ao longo do tempo. O bloco totalmente fechado evita, ainda, a entrada de luz no sistema de detecção permitindo maior eficiência na detecção da radiação emitida pela fonte.
5	Os anéis de borracha são imprescindíveis no encaixe entre as peças do módulo central para garantir que não haja entrada de luz no sistema de detecção.
6	Mesa para o posicionamento do sistema no laboratório, que possa sustentar a blindagem necessária e com altura para abrigar, futuramente, um detector de HPGe sob o sistema TDCR para a montagem do sistema de coincidência (figura 3).
7 a 13	Soluções radioativas de radionuclídeos emissores beta e que já foram padronizados no LMN, para teste e validação do novo sistema.

## Cronograma físico

<b>Atividade</b>	<b>Semestre</b>			
	<b>2 2017</b>	<b>1 2018</b>	<b>2 2018</b>	<b>1 2019</b>
Confecção do módulo central em alumínio e dos três encaixes laterais.	X			
Aquisição das fotomultiplicadoras.		X		
Confecção da mesa de apoio do sistema TDCR.	X			
Montagem do sistema TDCR.		X	X	
Programação da interface sistema-usuário em LABVIEW.		X	X	
Aquisição das soluções radioativas.		X		
Testes do sistema TDCR analógico.		X	X	X
Aquisição dos módulos e acessórios para digitalização dos sinais das fotomultiplicadoras do sistema TDCR.		X		
Programação do sistema de aquisição de dados digitalizados em C++.			X	X
Testes do sistema TDCR digital.			X	X

## Identificação dos participantes do projeto

Nome	Resumo do Curriculum Lattes
Dra. Denise Simões Moreira (coordenadora) Pesquisador Adjunto	Possui graduação em Bacharelado em Física pela Universidade de São Paulo (1994), mestrado (2000) e doutorado (2005) em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo e desenvolveu pesquisa em nível de pós doutorado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN), na área de Metrologia Nuclear em espectrometria de raios X e gama de baixas energias (2009). Tem experiência na área de Física Nuclear, com ênfase em Instrumentação para medida e controle da radiação, atuando principalmente na área de metrologia de radionuclídeos e nos seguintes temas: padronização de radionuclídeos em sistemas de medida absolutos com sistema de coincidência; espectrometria X e gama; determinação de probabilidades de emissão gama. Durante cinco anos atuou como pesquisadora do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LMNRI - IRD/CNEN), durante os quais esteve por seis meses desenvolvendo atividades como pesquisadora visitante no National Institute of Standards and Technology (NIST - EUA) e, atualmente, é pesquisadora do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN).
Dr. Mauro da Silva Dias Pesquisador Titular	Possui Bacharelado em Física pela Universidade de São Paulo (1973), mestrado em Engenharia e Ciências Nucleares pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1978) e doutorado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (1989). Fez doutorado-sanduíche no National Institute of Standards and Technology (NIST), EUA (1980-1983). Foi gerente do Centro do Reator de Pesquisas (CRPq) do IPEN-CNEN/SP no período de 2009 a 2013. Atualmente, é Pesquisador Titular do Centro do Reator de Pesquisas (CRPq) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), Docente de Cursos de Pós-Graduação na área de Tecnologia Nuclear pelo IPEN/ Universidade de São Paulo, além de Consultor Ad Hoc do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Tem experiência na área de Física Nuclear, com ênfase em Instrumentação para Medida e Controle de Radiação, atuando principalmente nos seguintes temas: Metrologia Nuclear e de Nêutrons, Simulações pelo Método de

Monte Carlo, sistemas de coincidência, câmaras de ionização e espectrometria gama.

Dra. Marina Fallone  
Koskinas  
Pesquisador Titular

Possui graduação em Física pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (1972), mestrado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (1978) e doutorado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (1988). Atualmente é pesquisador titular do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Tem experiência na área de Engenharia Nuclear, com ênfase em Instrumentação para Medida e Controle de Radiação, atuando principalmente nos seguintes temas: metrologia de radionuclídeos, padronização em sistemas de coincidências, determinação de parâmetros nucleares como probabilidade de emissão gama por decaimento.

Dr. Franco  
Brancaccio  
Tecnologista Senior

Graduado em Engenharia de Eletricidade - Escola Politécnica da USP (1980). Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (2002). Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (2013). Atualmente é Tecnologista Sênior do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, atuando principalmente nas seguintes áreas: - padronização de radionuclídeos (determinação de atividade e de outros parâmetros de decaimento) - metodologia primária, por contagem de coincidências - sistemas digitais de medidas (amostragem dos sinais de detecção e análise de dados por software) - metodologia relativa - sistemas com câmaras de ionização associadas a eletrômetros (método de integração de corrente) - desenvolvimento de sistemas e para metrologia nuclear (hardware e software).

Dr. Renato Semmler  
Pesquisador Titular

Bacharel em Física pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (1989), Mestre em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (1993) e Doutor em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (2006). Atualmente é Pesquisador Titular do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen - Cnen/SP), pesquisador associado da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Docente de Cursos de Pós-Graduação na área de Tecnologia Nuclear pelo IPEN - Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Física Nuclear de baixas

energias atuando nos seguintes temas: reações de captura de nêutrons térmicos (prompt gamma rays), método k0 de análise por ativação neutrônica, caracterização do espectro de nêutrons junto aos canais de irradiação do reator IEA-R1, espectroscopia gama, fotodesintegração, reações fotonucleares (fotofissão e fotonêutrons), e ensino de física. Professor e organizador da EAEN - Escola Avançada de Energia Nuclear para estudantes do Ensino Médio, preferencialmente envolvidos com olimpíadas de física e química: Teoria e Aplicações das Ciências Nucleares. Professor de física com mais de 25 anos de experiência em cursos universitários, pré-vestibular e ensino médio.

- MSc. Roberto Mauro Schoueri Possui graduação em Matemática pela Universidade Paulista e mestrado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (2016). Atualmente é projetista mecânico do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Tem experiência na área de Engenharia Nuclear, com ênfase em Aplicações Industriais de Radioisótopos. Atua como professor universitário ministrando disciplinas de Física em cursos superiores de Engenharia. Experiência em montagem e equipamentos para laboratórios de Física.
- MSc. Fábio de Toledo Técnico Possui graduação em Tecnologia em Eletrônica pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (1990) , mestrado pela Universidade de São Paulo (2009) , curso técnico-profissionalizante pela Escola técnica Estadual Guaracy Silveira (1985) e ensino fundamental pela Escola Estadual Alberto Torres (1981). Atualmente é Técnico em Eletrônica do Comissão Nacional de Energia Nuclear. Tem experiência na área de Física, com ênfase em Pesquisas em imageamento 3D com neutrons e tomografia.
- Oswaldo C. Alipio Técnico Possui formação de Técnico em Eletrônica e experiência em rotinas e técnicas de laboratório.

## **Disponibilidade efetiva de infraestrutura**

O LMN possui toda a infraestrutura base para o desenvolvimento dos ensaios propostos, não necessitando de obras para adequação do local.

Além disso, possui equipamentos que possibilitam a execução da primeira fase deste projeto, com a montagem e teste do sistema TDCR no modo analógico, como:

- Bases para as fotomultiplicadoras;
- Fonte de alta tensão;
- Pré-amplificadores;
- Discriminadores;
- Módulo de coincidência;
- Contadores

Para a validação do novo método poderão ser utilizados todos os sistemas absolutos e relativos do laboratório, a saber:

- Sistemas de Coincidência  $4\pi(\text{PC})\beta\text{-}\gamma$  (convencional e digital, com detector proporcional em geometria  $4\pi$ );
- Espectrômetro com detector semicondutor de HPGGe;
- Espectrômetro com detector cintilador de NaI(Tl);
- Câmara de Ionização tipo poço.

Além desses sistemas, também estarão disponíveis:

- Balança analítica Mettler XP56;
- Capela adequada para abertura de amostras.

## Referencias bibliográficas

- ANNUNZIATA M. L. Hand Book of Radioactivity Analysis Ed 2th Elsevier, 2003
- BIPM Monographie The application of liquid Scintillation Counting to Radionuclide Metrology no 3 (Sèvres: BIPM) 1980.
- BRODA, R. A review of the triple-to-double coincidence ratio (TDCR) method for standardizing radionuclides. Applied Radiation and Isotopes 58, pp. 585-594, 2003.
- BRODA R., CASSETTE P. and KOSSERT K. Radionuclide metrology using liquid scintillation counting. Metrologia 44 S36-S52, 2007.
- DIAS, M.S., LOGFIT, Código para ajustes logarítmicos, Relatório interno, LMN (IPEN), 1997.
- DIAS, M.S., LINFIT, Código para ajustes lineares, Relatório interno, LMN (IPEN), 1999.
- DIAS, M.S., TAKEDA, M.N., TOLEDO, F., BRANCACCIO, F., TONGU, M.L.O., KOSKINAS, M.F. Improvements in the Monte Carlo code for simulating  $4\pi\beta(\text{PC})$   $\gamma$  coincidence system measurements. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (Print), v. 698, pp. 177-184, 2013.
- DIAS, M.S., BRANCACCIO, F., TOLEDO, F., Koskinas, M.F. Disintegration rate, gamma-ray emission probabilities and metastable half-life measurements of  $^{67}\text{Ga}$ . Applied Radiation and Isotopes 87, pp. 126-131, 2014.
- HIDEX Oy (Ed.), 300 SL Automatic TDCR liquid scintillation counter service manual, 2009.
- ORNL, Monte Carlo N-Particle Transport Code System, MCNP5, RSICC Computer Code-Collection, Oak Ridge National Laboratory, 2006.
- KOSSERT, K., CARLES, A.G. Study of a Monte Carlo rearrangement model for the activity determination of electron-capture nuclides by means of liquid scintillation counting. Applied Radiation and Isotopes 66, pp. 998-1005, 2008.
- KOSSERT K., BRODA R., CASSETTE P., RATEL G., ZIMMERMAN B. Uncertainty determination for activity measurements by means of the TDCR method and the CIEMAT/NIST efficiency tracing technique. Metrologia 52: S172-S190, 2015.

POCHWALSKI, K., RADOSZEWSKI, T. Disintegration rate determination by liquid scintillation counting using the triple to double coincidence ratio (TDCR) method. Institute of Nuclear Research, Warsaw, INR 1848/OPiDI/E/A, 1979.

TAKEDA, M. N., DIAS, M. S., KOSKINAS, M. F. Cascade summing corrections for HPGe spectrometers by the Monte Carlo Method. Applied Radiation and Isotopes, v. 56, pp. 105-109, 2002.