

Projeto NEUTRINOS – ANGRA

Detector de Antineutrinos para Monitorar a Composição do Combustível e Potência Térmica de Reatores Nucleares

**J.C. Anjos^a, A.F. Barbosa^a, R.Z. Funchal^b, R.M.O. Galvão^{a,b},
G.P. Guedes^f, M.M. Guzzo^c, E. Kemp^c, H. Lima Jr^a,
J. Magnin^a, H. da Motta^a, H. Nunokawa^d, I.M. Pepe^e,
O.L.G. Peres^c, R.C. Shellard^{a,d}, F.R.A. Simão^a, M. Vaz^a**

a- Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF- Brasil

b- Universidade de São Paulo – USP- Brasil

c- Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – Brasil

d- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ – Brasil

e-Universidade Federal da Bahia – UFBA – Brasil

f-Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS – Brasil

RESUMO

O problema de salvaguardas nucleares é um dos tópicos mais relevantes para a ampliação da participação de reatores nucleares na matriz energética mundial. Por isso é um dos temas prioritários na agenda de pesquisa da Agência Internacional de Energia Atômica.

Neste documento apresentamos o projeto básico de um detector de antineutrinos para ser usado como monitor da potência térmica instantânea dissipada por reatores nucleares e da composição do combustível nuclear. O mesmo tipo de detector pode também ser empregado em medidas de uma propriedade fundamental dos neutrinos, o ângulo de mistura quântico θ_{13} . O princípio do monitoramento se baseia na relação entre a potência térmica instantânea gerada pelo reator e a taxa de eventos de neutrinos registrados pelo detector, e também, na possibilidade de detectarmos modificações no espectro dos antineutrinos durante a queima de combustível, que altera gradualmente as frações dos isótopos da composição. Essa aplicação de física de neutrinos se amolda aos propósitos do programa da AIEA de desenvolvimento de novas técnicas para controle e aplicação de salvaguardas da não-proliferação de armas nucleares.

1. Introdução

Nos últimos anos, a física experimental realizou grandes progressos na construção de um panorama consistente da fenomenologia de neutrinos¹, com importante contribuição de experimentos que usam reatores nucleares como fonte de partículas [Goesgen, Bugey, Chooz, KamLAND, Palo Verde]². Este cenário abre perspectivas concretas para o uso de neutrinos como sondas confiáveis de processos físicos dos quais participam. Este documento propõe o uso de um detector de antineutrinos com capacidade de monitorar parâmetros relacionados à atividade de reatores nucleares, como a composição isotópica do combustível e a potência térmica instantânea liberada pelo reator. Tais parâmetros são cruciais para verificação de itens das salvaguardas ditadas pela AIEA para não-proliferação de armas nucleares, além de contribuir com informações que podem otimizar o processo de geração de energia elétrica.

Atualmente, informações detalhadas da composição do combustível nuclear após o início da atividade do reator, são obtidas por simulações computacionais alimentadas com parâmetros das condições iniciais e da história térmica do reator. A obtenção de resultados confiáveis, a partir desse método, depende fortemente de cooperação irrestrita do operador do reator, além de apresentar óbvias possibilidades de desvio não declarado de parte ou de todo combustível nuclear.

Trabalhos recentes demonstraram a viabilidade em usar a emissão de neutrinos como indicador em tempo real da atividade de reatores nucleares. Monitores desse tipo já foram testados³ e um deles está em operação na usina de San Onofre (U.S.A.)⁴. Adicionalmente, alguns trabalhos teóricos recentes discutem que um detector preciso poderia medir a energia e reconstruir a forma do espectro dos antineutrinos com detalhes suficientes para determinar as contribuições de cada isótopo presente no combustível e a potência térmica instantânea com precisão percentual de algumas unidades⁵.

O fato que o Brasil dispõe do reator nuclear Angra II de 4GW de potência, equivalente a 10^{20} fissões por segundo, permite obter em um detector com apenas 1 m³ de material sensível, uma taxa de milhares de eventos de neutrinos por dia, possibilitando inserir o Brasil de forma atuante e competitiva nesta área de fronteira da física.

2. O Detector

O detector que propomos é formado por quatro subsistemas: i) o “alvo”, volume de detecção de antineutrinos, localizado na parte mais interna e central; ii) o detector de gamas, zona intermediária para otimização do alvo; iii) a blindagem, volume externo para absorção da radioatividade local; iv) o veto, camada mais externa do aparato que filtra sinais espúrios originados por múons da radiação cósmica. Os três primeiros são cilindros concêntricos, e juntos formam o sistema de detecção de antineutrinos. São preenchidos com cintilador líquido e monitorados por fotomultiplicadoras para detecção da luz

¹ Kajita T. and Totsuka Y., 2001, Rev. Mod. Phys. 73, 85. Ahmad Q. R. et al., Phys.Rev.Lett. 89, 011301, 2002

² Goesgen : Zacek G. et al., 1986, Phys. Rev. D34, 2621. Bugey : Achkar B. et al., 1995, Nucl. Phys. B434, 503. Chooz: Apollonio et al., Eur.Phys.J., C27, 331, 2003. KamLAND: A.Suzuki, Nucl. Phys. Proc. Suppl., 137, 21,2004. Palo Verde : F.Boehm et al., Phys.Rev., D64, 112001, 2001.

³ Yu. V. Klimov et al., Atomic Energy, 73, 123, 1994

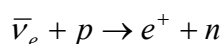
⁴ N.S.Bowden, J.Batteux, A.Bernstein et al., “First Results from a Nuclear Reactor Monitoring Antineutrino Detector”, unpublished. Contact person: N.S.Bowden (nbowden@sandia.gov) e A.Bernstein, “Nuclear reactor safeguards and monitoring with anti-neutrino detectors”. e-Print Archive: nucl-ex/0108001.

⁵ P.Huber and T.Schwetz, Phys.Rev.D70:053011,2004

produzida pelas interações de antineutrinos. O último subsistema, o veto de raios cósmicos, envolve completamente o detector de antineutrinos com placas de cintilador plástico. A Figura 1 mostra um desenho esquemático do detector completo, onde destacamos, para visualização, os cilindros internos, e no texto que segue fazemos uma descrição concisa dos princípios de funcionamento com detalhes adicionais de cada subsistemas.

2.a O Alvo

O alvo é feito por um reservatório de acrílico preenchido com um total de 1 tonelada de cintilador líquido dopado com gadolínio. A base do cintilador líquido, em geral, é feita por solvente orgânico (tipicamente C_nH_{n+2} , $\langle n \rangle = 10$) adicionado de ativador de cintilação PPO e deslocador de comprimento de onda POPOP. A abundância de prótons “livres” (hidrogênio) desse tipo de composto garante um grande número de partículas alvo para o principal canal de interação de antineutrinos, o decaimento beta-inverso:



A assinatura das interações de antineutrinos é fornecida pela detecção dos secundários da reação acima. O pósitron gera um primeiro sinal luminoso no cintilador líquido, seguido pelo sinal da interação dos gamas gerados com a captura do nêutron. Ambos sinais devem ocorrer dentro de um intervalo com duração típica de $50 < \Delta t < 150 \mu s$, onde τ é o tempo médio de captura do nêutron e depende da concentração de gadolínio no cintilador.

A energia dos antineutrinos é obtida da energia do pósitron pela relação $E_\nu = E_{e^+} + \Delta M_{np}$, ou seja, a energia do pósitron somada com a energia correspondente à diferença de massa entre o nêutron e o próton. Ressaltamos que a energia visível (luz) é $E_{vis} = E_{e^+} + E_\gamma$, com contribuição adicional dos gamas de aniquilação do pósitron.

O cintilador contém uma concentração entre $0,1 \div 0,5\%$ de gadolínio, elemento que aumenta a eficiência de captura de nêutrons de um fator até 10^5 quando comparada com o processo de formação do dêuteron. A melhor eficiência de captura se traduz no aumento da relação sinal-ruído, pois permite menores intervalos de tempo para detecção dos gamas de captura, reduzindo a probabilidade de contaminação do sinal por pulsos espúrios.

2.b Detector de Gamas

O segundo cilindro do sistema de detecção de neutrinos é o detector de gamas, zona adicional de cintilador líquido também acondicionado em reservatório de acrílico, porém não dopado com Gd. Sua função é estender o volume de coleta dos gamas de captura de nêutrons e, conseqüentemente, aumentar o volume fiducial do alvo.

2.c Blindagem

O terceiro e último volume cilíndrico contém o líquido base, sem adição de compostos cintiladores nem Gd (base não cintiladora). Sua função é blindar a o alvo e o detector de gamas contra radiação externa ao detector, gerada inclusive pelos seus próprios componentes. O reservatório externo é feito de aço inoxidável que também sustenta a estrutura mecânica de fixação das fotomultiplicadoras (FMs). As FMs são orientadas espacialmente para monitorar todo o interior do tanque quanto a ocorrência de pulsos luminosos

produzidos pelas partículas interagentes no cintilador líquido. Esta configuração requer que a luz se propague dentro do tanque em meios com mesmas propriedades ópticas, para atingir de modo homogêneo as FMs, então os três subsistemas, alvo, detector de gamas e blindagem, são preenchidos com a mesma base líquida, porém com aditivos diferenciados de acordo com o volume que a contém (alvo: Gd+PPO+POPOP; detector de gamas: PPO+POPOP; blindagem: sem aditivos). Todo o volume interno dos cilindros é monitorado por fotomultiplicadoras com 8" de diâmetro, distribuídas com espaçamento regular, cobrindo com densidade uniforme ~ 15% da superfície efetiva do cilindro de blindagem com área sensível à luz. As paredes internas da blindagem devem ser cobertas com material refletor (*tyvek*, por exemplo) para otimizar a eficiência na coleta de luz.

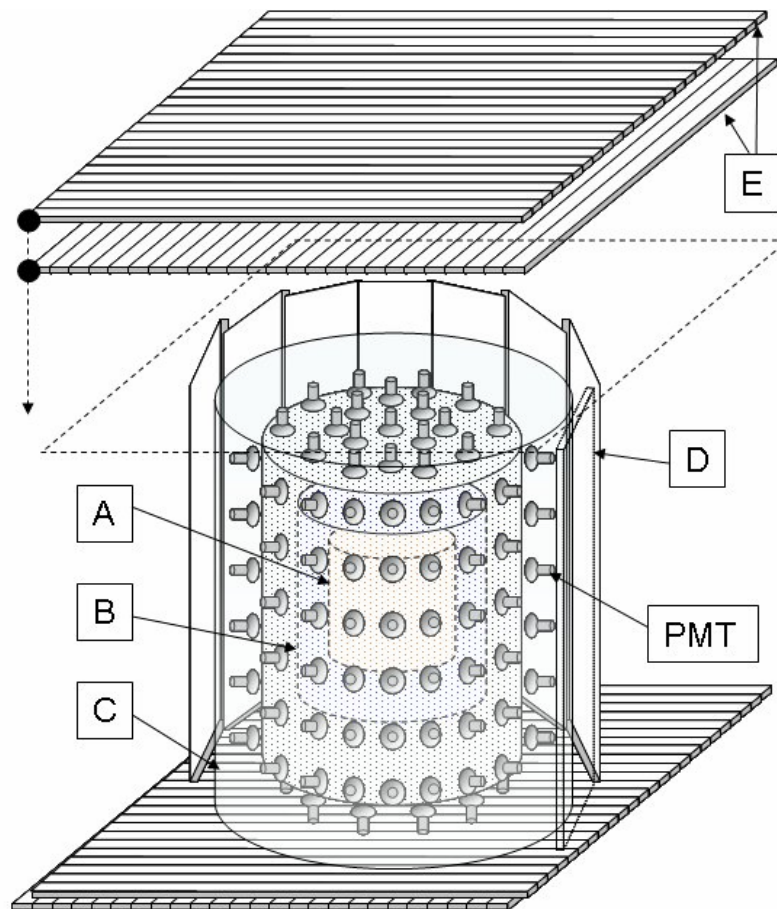


Figura 1: Desenho esquemático do detector mostrando os quatro subsistemas: as letras correspondem aos itens no texto. O volume aproximado do sistema é de $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$.

2.d Sistema de Veto

É a camada mais externa, feita por placas de cintilador plástico cobrindo os subsistemas internos de detecção de neutrinos (alvo + detector de gamas + blindagem). Todas as placas são monitoradas por FMs que trabalham em coincidência rápida de sinais ($\sim \text{ns}$) disparada por múons da radiação cósmica que atravessam o arranjo experimental. Os múons podem produzir nêutrons no material externo ao alvo (seja do detector ou do ambiente), via processo de espalação. Estes nêutrons de fundo podem ser capturados no cintilador líquido, produzindo gamas em coincidência com o sinal do múon ou algum outro sinal

espúrio, induzindo uma falsa assinatura de um evento de antineutrino. Então, o disparo do sistema de veto, suprime a leitura de sinais por um intervalo de tempo ajustável segundo a taxa local de contagem de múons, obtida por métodos independentes. Uma apreciável redução de ruído dessa natureza pode ser alcançada se o experimento puder ser instalado em locais com condições adequadas de blindagem externa, por exemplo, algumas dezenas de metros sob a terra ou, alternativamente, usando paredes espessas de algum material denso (ferro ou concreto, por exemplo).

3. A Localização do Detector

Em visita realizada à central nuclear de Angra dos Reis, em 21/10/2005, foram selecionados dois locais, a cerca de 60 metros do reator Angra II, adequados para instalação do laboratório experimental. Os critérios de escolha foram baseados em itens de segurança de operação e mínima interferência nas atividades da central nuclear.

Neste sítio pretende-se iniciar a instalação das facilidades experimentais, em um programa que deve ser desenvolvido em etapas. Uma primeira etapa requer a construção de uma sala experimental externa, montada num container comercial, com cerca de 15 a 20 m², com infraestrutura de eletricidade e comunicação (linha telefônica e de dados). Com essa instalação externa simples, poder-se-ia iniciar as atividades experimentais com a operação de uma versão inicial do alvo. O material para construção desse detector inicial já está disponível entre os membros da colaboração científica. Os demais sub-sistemas do detector de neutrinos podem ser incorporados posteriormente. O funcionamento do detector é automático, com a aquisição de dados podendo ser monitorada remotamente. Esse fato implica que a presença de cientistas no local pode se mostrar necessária apenas em visitas esporádicas de inspeção, controle e eventuais manutenções. Nessa fase espera-se recolher informações e experiência com a operação do detector nas condições específicas do sítio experimental para conduzirmos de maneira eficiente o projeto e construção do detector em sua configuração final.

A segunda etapa de instalação prevê a construção de uma sala experimental subterrânea, localizada a algumas dezenas de metros de profundidade. Na sala subterrânea, o nível do ruído induzido por radiações externas é consideravelmente baixo, reduzindo os erros sistemáticos e aumentando a precisão dos resultados. Numa primeira fase espera-se, como resultado prático, que se estabeleça a relação entre a potência térmica do reator e a taxa de contagem de neutrinos. Esse monitoramento pode ser estabelecido após algumas semanas de aquisição de dados, para calibração e obtenção do regime correto de operação. A técnica que deve ser utilizada para o monitoramento já foi testada com sucesso em uma central nuclear russa³ e será discutida na próxima seção deste projeto.

Nessa fase pode-se também iniciar o processo de obtenção da composição isotópica do combustível nuclear, visto que essa medida requer uma espectroscopia de precisão do fluxo de neutrinos produzidos no reator, que pode ser alcançada com a forte supressão do ruído.

4. Monitoramento de Potência

O formalismo matemático e a técnica experimental para determinação em tempo real da potência térmica do reator pode ser encontrado em detalhes na referência [3]. Pode-se mostrar que a relação entre a frequência de neutrinos observados no detector n_ν e a potência térmica dissipado no reator W_t é dada pela expressão:

$$n_\nu = \gamma(1 + k) W_t$$

onde γ e k são constantes, que englobam fatores geométricos do detector e as contribuições ao fluxo de neutrinos de cada componente do combustível, respectivamente. Assim temos uma dependência linear entre essas grandezas. A Figura 2 mostra um gráfico com os resultados obtidos pelo grupo do reator russo de Rovno, onde pode-se ver a excelente concordância com o modelo acima.

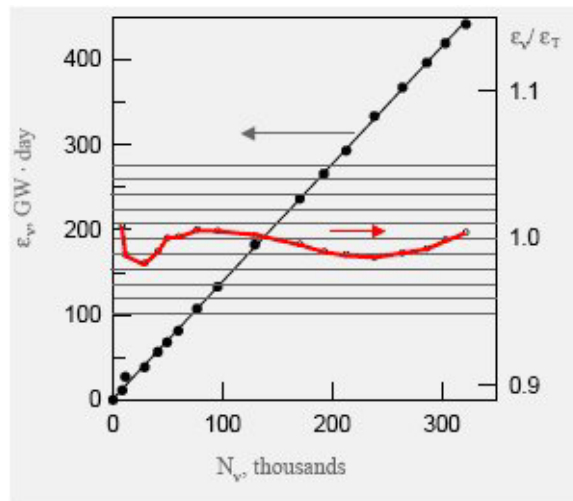


Figura 2: Medida realizada pelo grupo russo do reator de Rovno [referência 3] mostrando a excelente concordância entre o modelo linear (linha preta) e os resultados experimentais da relação entre potência do reator e frequência de neutrinos. No mesmo gráfico, na outra escala, pode-se ver a relação entre os valores de potência medida com neutrinos e valores medidos diretamente no reator (linha vermelha), mostrando que a concordância é melhor que 2%.

Encontra-se em andamento os cálculos para determinação dos parâmetros da relação $W_t(n_\nu)$ para o caso do detector proposto.

5. Número Esperado de Eventos

As taxas esperadas para eventos de antineutrinos (contagem total N , contagem em um certo intervalo de tempo $N(\leq t)$, taxa instantânea de contagem $\frac{dN}{dt}$, espectro $\frac{dN}{dE_s}$ e evolução espectral $\frac{d^2N}{dt dE_\nu}$) podem ser calculadas exatamente integrando uma expressão complexa⁶ que envolve características do detector e da fonte emissora de neutrinos. Entretanto, uma

⁶ E.Kemp, PhD Thesis, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Brasil, 2000.

estimativa simples pode ser obtida se usarmos alguns valores médios e grandezas típicas⁷. Vamos admitir a seguinte composição média para o combustível do reator após um ciclo de queima:

- ²³⁵U (55.6%), ²³⁹Pu (32.6%), ²³⁸U (7.1%) and ²⁴¹Pu (4.7%)

A energia média liberada em cada fissão é $W = 203.78$ MeV e a seção de choque ponderada em energia é

- $\langle \sigma \rangle = 5.825 \times 10^{-43} \text{ cm}^2 / \text{fissão}$.

A taxa de fissões N_f pode ser relacionada com a potência térmica do detector P_{th} através da fórmula

- $N_f = 6.241 \times 10^{18} \text{ s}^{-1} (P_{th} [\text{MW}] / W[\text{MeV}])$

A taxa de contagem R_D em um detector com N_T partículas-alvo (prótons) a uma distância D da fonte (reator), admitindo a ausência de oscilações* é:

$$R_D = N_f \cdot \langle \sigma \rangle \cdot N_T \cdot (4 \pi D^2)^{-1}$$

A Figura 3 mostra o espectro de energia medido dos isótopos presentes no combustível (extraído da referência⁷) e a tabela I mostra as taxas de eventos calculadas para algumas distâncias representativas entre o alvo e o núcleo do reator, onde usamos 1 tonelada de massa de cintilador e $P_{TH} = 4$ GW, valor típico para os atuais unidades PWR empregadas em um grande número de usinas.

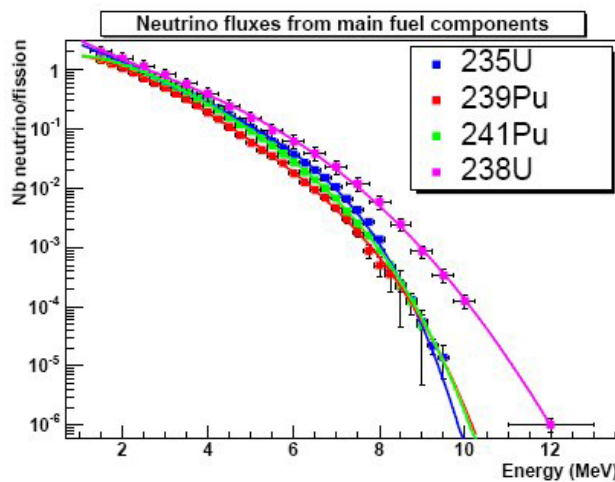


Figura 3: Espectro de energia de antineutrinos dos principais componentes do combustível nuclear. (O espectro do ²³⁸U foi calculado teoricamente, logo as barras de erro não são mostradas.)

Distância [m]	Taxa de Contagem [ev/sec]	Número Total de Eventos		
		1 dia	3 meses	1 ano
25	3.76E-01	3.25E+04	2.92E+06	1.17E+07
50	9.40E-02	8.12E+03	7.31E+05	2.96E+06
100	2.35E-02	2.03E+03	1.83E+05	7.41E+05
200	5.88E-03	5.08E+02	4.57E+04	1.85E+05

Tabela I: Taxa de contagem de eventos vs. Distância e número integrado de eventos.

⁷ Letter of intent of Double-Chooz: <http://doublechooz.in2p3.fr/0405032.pdf>

* hipótese plausível no caso de detectores muito próximos à fonte.

6. Conclusões e Perspectivas

Apresentamos o projeto básico de um detector de antineutrinos para realizar medidas de energia e espectroscopia com boa acurácia, requisito fundamental na aplicação desta técnica como ferramenta de monitoramento⁵ no âmbito das salvaguardas de não proliferação e uso pacífico da energia nuclear estipuladas pela AIEA. Da Tabela I podemos ver a boa estatística que deve ser alcançada em pouco tempo, logo o principal esforço do programa de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da construção do detector deve se concentrar na redução das fontes potenciais de erros sistemáticos do instrumento, de maneira a alcançarmos a precisão requerida. Devemos observar que as idéias básica envolvidas no desenho do detector já foram submetidas a teste com o experimento SANDS, operado por uma colaboração entre o Lawrence Livermore National Laboratory e o Sandia Laboratory (CA – U.S.A.) na usina nuclear de San Onofre⁴. Os resultados obtidos são promissores, mostrando um monitoramento inequívoco do fluxo de antineutrinos⁸, apesar a acurácia na obtenção do espectro não ter alcançado o nível requerido para medidas precisas de composição do combustível nuclear. Assim, a atual proposta almeja o desenvolvimento das idéias que foram aplicadas no aparato SANDS.

Estamos em contato com o Dr. David Reyna (Argonne National Laboratory), Dr. Adam Bernstein (Lawrence Livermore National Laboratory), Dr. Thierry Lasserre (CEN Saclay), e Dr. Walter Fulgione (INFN) que concordaram em participar no programa de P&D para melhoria do aparato experimental.

Pre vemos para breve o início do processo de formalização dos acordos de cooperação com os grupos de pesquisa mencionados. Em particular devemos cooperar com o experimento Double Chooz, na França, atualmente o mais avançado detector de neutrinos de reatores em construção. Esta cooperação nos permitirá adquirir experiência operacional em algumas tecnologias empregadas como o desenvolvimento de cintiladores líquidos dopados com gadolínio. Observamos que todos colaboradores internacionais e brasileiros mencionados neste documento, bem como novos convidados, reuniram-se no Brasil em Maio/2006, em Oficina realizada no CBPF – RJ, dedicada ao aprimoramento do projeto.

Ressaltamos o caráter internacional da rede de cientistas e pesquisadores colaboradores desse projeto, cujo perfil é perfeitamente adequado para a meta de construirmos um instrumento preciso para determinação da composição do combustível nuclear, usando como indicador o espectro de antineutrinos do reator; ou seja, através de uma medida direta, diversamente dos métodos atualmente empregados. Além disso, boa experiência deve ser adquirida para estudos na área de partículas elementares, como a medida do ângulo de mistura Theta-13, entre neutrinos de diferentes famílias.

Além dos ganhos científicos e tecnológicos podem ser vistos como conseqüências diretas da realização desse projeto a projeção internacional do Brasil como país atuante não só na área de física básica mas também em física aplicada e em especial na área salvaguardas nucleares, dando uma

⁸ N.S.Bowden, J.Batteux, A.Bernstein et al., “First Results from a Nuclear Reactor Monitoring Antineutrino Detector”, unpublised. Contact person: N.S.Bowden (nbowden@sandia.gov)

demonstração clara de nosso compromisso com a utilização pacífica da energia nuclear.