

REJEITOS RADIOATIVOS

Goro Hiromoto
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Laboratório de Rejeitos Radioativos

1. INTRODUÇÃO

Todas as atividades que envolvem o uso de materiais radioativos geram, em alguma etapa do processo, resíduos denominados rejeitos radioativos.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) define rejeito radioativo como sendo “qualquer material resultante de atividades humanas que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção, especificados na *Norma CNEN-NE-6.02 Licenciamento de Instalações Radiativas* e para o qual a reutilização é imprópria ou não prevista”. O termo “limite de isenção”, aplicado aos rejeitos, pode ser compreendido como sendo o nível de atividade abaixo do qual a autoridade considera que os riscos correspondentes são insignificantes e não requerem controle legal.

Os rejeitos radioativos podem ser classificados por diversos critérios: requisitos de segurança para seu manuseio; estágio de desenvolvimento da indústria nuclear em um país; regulamentos e normas de transporte; características físico-químicas; concentração de material radioativo presente nos rejeitos etc. Nestas classificações são comumente utilizados os termos “nível baixo”, “nível médio” e “nível alto”, e embora os valores numéricos que diferenciam estes termos sejam distintos em diversos países, seguem os seguintes conceitos:

- rejeitos de nível baixo - não requerem blindagem para manuseio e transporte;
- rejeitos de nível médio - requerem blindagem para manuseio e transporte e não são geradores de calor;
- rejeitos de nível alto - requerem blindagem e também resfriamento, uma vez que são geradores de calor.

Na prática, utiliza-se principalmente a classificação referente às características físicas e químicas e ao tipo de tratamento que o rejeito será submetido.

No Brasil a classificação em vigor baseia-se na forma física, na concentração de atividade e nos tipos de emissores presentes, e está descrita na Norma “*CNEN NE-6.05 Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas*”. Nas tabelas 1, 2, 3, 4 e 5 é apresentada esta classificação.

Tabela 1 - Classificação de rejeitos líquidos contendo emissores β - γ , com concentração de emissores α inferior a $3,7 \times 10^8$ Bq/m³

CATEGORIA	CONCENTRAÇÃO (c)	
	(Bq/m ³)	(Ci/m ³)
Baixo Nível de Radiação	$c \leq 3,7 \times 10^{10}$	$c \leq 1$
Médio Nível de Radiação	$3,7 \times 10^{10} < c \leq 3,7 \times 10^{13}$	$1 < c \leq 10^3$
Alto Nível de Radiação	$c > 3,7 \times 10^{13}$	$c > 10^3$

Tabela 2 - Classificação de rejeitos líquidos contendo emissores β - γ , com concentração de emissores α superior a $3,7 \times 10^8$ Bq/m³

CATEGORIA	CONCENTRAÇÃO (c)	
	(Bq/m ³)	(Ci/m ³)
Alfa de Baixo Nível de Radiação	$3,7 \times 10^8 < c \leq 3,7 \times 10^{10}$	$10^{-2} < c \leq 1$
Alfa de Médio Nível de Radiação	$3,7 \times 10^{10} < c \leq 3,7 \times 10^{13}$	$1 < c \leq 10^3$
Alfa de Alto Nível de Radiação	$c > 3,7 \times 10^{13}$	$c > 10^3$

Tabela 3 - Classificação de rejeitos sólidos contendo emissores β - γ , com concentração de emissores α inferior a $3,7 \times 10^8$ Bq/m³

CATEGORIA	TAXA DE EXPOSIÇÃO (X) NA SUPERFÍCIE	
	(μ C/kg.h)	(R/h)
Baixo Nível de Radiação	$X \leq 50$	$X \leq 0,2$
Médio Nível de Radiação	$50 < X \leq 500$	$0,2 < X \leq 2$
Alto Nível de Radiação	$X > 500$	$X > 2$

Tabela 4 - Classificação de rejeitos sólidos contendo emissores β - γ , com concentração de emissores α superior a $3,7 \times 10^8$ Bq/m³

CATEGORIA	CONCENTRAÇÃO (c)	
	(Bq/m ³)	(Ci/m ³)
Alfa de Baixo Nível de Radiação	$3,7 \times 10^8 < c \leq 3,7 \times 10^{11}$	$10^{-2} < c \leq 10$
Alfa de Médio Nível de Radiação	$3,7 \times 10^{10} < c \leq 3,7 \times 10^{13}$	$10 < c \leq 10^3$
Alfa de Alto Nível de Radiação	$c > 3,7 \times 10^{13}$	$c > 10^3$

Tabela 5 - Classificação de rejeitos gasosos

CATEGORIA	CONCENTRAÇÃO (c)	
	(Bq/m ³)	(Ci/m ³)
Baixo Nível de Radiação	$c \leq 3,7$	$c \leq 10^{-10}$
Médio Nível de Radiação	$3,7 < c \leq 3,7 \times 10^4$	$10^{-10} < c \leq 10^{-6}$
Alto Nível de Radiação	$c > 3,7 \times 10^4$	$c > 10^{-6}$

2. ORIGEM DOS REJEITOS RADIOATIVOS

Os rejeitos radioativos podem ser ainda classificados de acordo com sua origem, em três principais grupos: rejeitos institucionais, rejeitos do ciclo do combustível e rejeitos de descomissionamento.

2.1 Rejeitos institucionais

Os rejeitos institucionais são aqueles gerados na produção de radioisótopos e na aplicação de radioisótopos na indústria, clínicas médicas, hospitais, centros de pesquisa, agricultura etc. As características típicas destes rejeitos são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Características típicas de rejeitos institucionais

Tipo de rejeito	Rejeito gerado por instalação		Radionuclídeos
	m ³ /ano	Concentração de Atividade ou Taxa de Dose média	
PESQUISA			
Líquidos inorgânicos	100 - 500	40 kBq/m ³ - 4 GBq/m ³	Produtos de corrosão, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs, ^{121m} Te, ³² P, ⁵¹ Cr, ⁵⁹ Fe, ^{99m} Tc, ¹¹¹ In, ¹³¹ I, ³⁵ S, ^{nat} U, ^{nat} Th, ¹²⁵ I, ⁹⁰ Y, ³ H, ¹⁴ C
Líquidos orgânicos	0,1 - 1	40 kBq/m ³	
Res. de troca-iônica	0,5 - 1,5	20 - 40 GBq/m ³	
Sólidos compactáveis	50 - 100	< 0,1 mSv/h	
Sólidos não compact.	5 - 10	< 0,1 mSv/h	
MEDICINA			
Líquidos inorgânicos	5 - 50	40 kBq/m ³ - 4 MBq/m ³	³⁵ S, ⁵¹ Cr, ⁵⁹ Fe, ^{99m} Tc, ¹¹¹ In, ¹³¹ I, ³ H, ¹⁴ C, ³² P, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ¹⁹² Ir, ²²⁶ Ra
Sólidos compactáveis	50 - 100	< 0,1 mSv/h	
Fontes seladas	1 - 2	1 - 10 Sv/h	
Agulhas de Rádio	1 - 2	1 - 10 Sv/h	
INDÚSTRIA			
Fontes seladas	1 - 2	1 - 10 Sv/h	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ¹⁵² Ir, ²³⁹ Pu, ²⁴¹ Am
Detetores de fumaça	1 - 2	< 0,1 mSv/h	

Rejeitos sólidos. Os rejeitos sólidos podem ser agrupados como: fontes exauridas, peças e equipamentos, rejeitos biológicos e materiais de proteção e limpeza.

- **fontes exauridas.** Podem ter atividade variando de kBq a TBq de acordo com o radionuclídeo e sua aplicação. A tabela 7 apresenta exemplos deste tipo de rejeito sólido institucional; embora as fontes exauridas representem uma fração muito pequena do volume, são as principais contribuintes em termos de atividade dos rejeitos.
- **peças e equipamentos.** São constituídos geralmente por partes de equipamentos, blindagens e peças de metal, plástico ou madeira contaminadas com material radioativo e sem possibilidade de descontaminação, com níveis de atividade variados (kBq - TBq). Vazamentos acidentais de fontes não seladas são uma das causas freqüentes na geração deste tipo de rejeito.
- **rejeitos biológicos.** Englobam as carcaças de animais usados em experimentos e a excreta de pacientes submetidos a diagnóstico ou terapia. Esse tipo de rejeito apresenta, além do risco radiológico, riscos químicos e biológicos, tais como emanação de gases tóxicos e contaminação com agentes patogênicos.

Tabela 7 - Características das fontes exauridas utilizadas em diversas aplicações

APLICAÇÃO	FONTE	ATIVIDADE
PESQUISA		
Calibração de instrumentos	^3H , ^{14}C , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}U , ^{241}Am	< 0,1 GBq
Irradiador	^{60}Co	1 - 1.000 TBq
MEDICINA		
Densitometria óssea	^{241}Am , ^{125}I	1 - 10 GBq
Teleterapia	^{60}Co	50 - 500 TBq
Braquiterapia	^{226}Ra	100 - 500 MBq
INDÚSTRIA		
Radiografia industrial	^{192}Ir	0,1 - 5 TBq
	^{60}Co	0,1 - 1 TBq
Sensor de nível	^{137}Cs	0,1 - 20 GBq
	^{60}Co	0,1 - 10 GBq
Esterilização e conservação de alimentos	^{60}Co	0,1 - 400 TBq
Perfuração de poços	$^{241}\text{Am-Be}$	1 - 500 GBq
	^{137}Cs	1 - 100 GBq
Detetor de fumaça	^{241}Am	1 - 1.000 kBq
Pára-raios	^{241}Am	2 - 200 MBq

- **materiais de proteção e limpeza.** São gerados em todas as atividades que envolvem o manuseio de substâncias radioativas, constituindo-se de vestimentas de proteção como aventais, luvas, sapatilhas, toucas e máscaras e de materiais de higiene e limpeza tais como papel absorvente, lençóis e lenços descartáveis, algodão, bandagens etc. Este tipo de rejeito contribui, em termos de volume, com a maior parte dos rejeitos institucionais sólidos, sendo gerado rotineiramente em todos os laboratórios e instalações onde são manuseadas fontes não seladas.

Rejeitos líquidos. Os rejeitos líquidos são agrupados como líquidos orgânicos e inorgânicos.

- **líquidos orgânicos** - incluem: óleos lubrificantes provenientes principalmente de centros de pesquisa; soluções cintiladoras provenientes de laboratórios de análises clínicas; solventes utilizados em experimentos em geral e algumas operações de descontaminação.
- **líquidos inorgânicos** - O volume dos rejeitos líquidos inorgânicos gerado anualmente é bem superior ao volume dos orgânicos, entretanto o volume total é resultado de uma somatória de pequenos volumes cujas características físicas e composições químicas são extremamente variadas.

Rejeitos gasosos. São gerados principalmente durante a produção de radioisótopos (^{24}Na , ^{32}P , ^{35}S , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{51}Cr , ^{67}Ga), sendo constituídos por gases e aerossóis contendo estes radionuclídeos.

2.2 Rejeitos do ciclo do combustível

São aqueles gerados durante as etapas do ciclo de fabricação e utilização do combustível nuclear, desde a mineração até o reprocessamento ou armazenamento do elemento combustível queimado. As características dos rejeitos, bem como as etapas do ciclo do combustível que serão apresentadas a seguir, estão relacionadas com a operação de reatores do tipo PWR, que são os existentes no Brasil.

Mineração e beneficiamento. Esta etapa compreende a prospecção, mineração, extração e beneficiamento do minério de urânio, e tem como objetivo a obtenção de um concentrado de urânio na forma de diuranato de sódio, $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$, ou de amônio, $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$, que é denominado genericamente de “yellow-cake”.

O urânio é encontrado na natureza como uma mistura de isótopos de urânio na proporção de 0,72% de ^{235}U , 99,275% de ^{238}U e 0,005% de ^{234}U associado à diversos minerais, como a apatita, fosforita, ouro etc, em concentrações baixas. Atualmente, são beneficiados minérios com concentração de urânio da ordem de 0,1%, ou seja, 1kg de U para cada tonelada de minério, e por esta razão, a quantidade de minério movimentada é muito grande.

As características dos rejeitos gerados nesta etapa estão relacionadas principalmente com os processos de extração e beneficiamento. Nestes processos, o minério triturado é lixiviado com ácidos ou carbonatos e a solução resultante é submetida a um processo de extração com solvente para remoção do urânio. Em seguida, por meio de precipitação química e calcinação, obtém-se o “yellow-cake” com um teor típico que varia de 75 - 90% de urânio.

Os rejeitos radioativos desta etapa do ciclo do combustível podem ser classificados como rejeitos de nível baixo de radiação, contendo principalmente radionuclídeos emissores α de meia vida longa.

Refino e conversão. Estas etapas consistem na remoção das impurezas químicas do “yellow-cake” e na conversão do urânio do estado sólido para o estado gasoso, na forma de hexafluoreto de urânio, UF_6 .

A indústria do urânio comumente usa dois processos para a purificação e a conversão do yellow-cake: (a) Processo seco - fluoração seguida de destilação fracionada e (b) Processo úmido - extração com solvente seguida de fluoração.

No processo seco o yellow-cake é calcinado para a obtenção de U_3O_8 e o produto obtido é moído e reumedecido a fim de formar placas de U_3O_8 . Estas placas são então submetidas a uma redução química com hidrogênio, H_2 , onde se obtém UO_2 na forma de pó. Este produto reage com HF em uma série de reatores de leito fluidizado convertendo-se assim em UF_4 em pó. Por meio de uma reação do UF_4 com flúor gasoso, F_2 , é obtido o UF_6 . O UF_6 produzido é então purificado em uma série de colunas de destilação fracionada, obtendo-se UF_6 com pureza de 99,99%.

No processo úmido o yellow-cake é digerido em ácido nítrico, HNO_3 formando assim o nitrato de urânio impuro, $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$. Após filtragem, esta solução é purificada por extração com solvente. O solvente carregado com urânio é então lavado com água acidulada e o nitrato de urânio puro é reextraído. A solução obtida é então concentrada e passa por uma fase de desnitração para obtenção do trióxido de urânio, UO_3 . O produto obtido é moído e a conversão do UO_3 em UF_6 se dá utilizando-se técnica similar àquela do processo seco, sendo desnecessária uma etapa posterior de purificação.

A diferença básica entre os dois processos reside no fato de que no processo seco a conversão em UF_6 precede o refino, enquanto no processo úmido a conversão sucede o refino. Esta diferença faz com que os rejeitos gerados em ambos processos sejam distintos, embora sejam classificados como rejeitos de nível baixo de radiação contendo emissores α de meia vida longa.

No processo seco os rejeitos são gerados quase que exclusivamente durante a destilação fracionada constituindo-se de cinzas. Estas cinzas contêm fluoretos metálicos (ferro, magnésio, cobre, etc.), ^{238}U e ^{235}U residuais e radionuclídeos de suas cadeias de decaimento em quantidades de aproximadamente 0,1 tonelada por tonelada de UF_6 produzido.

No processo úmido são gerados rejeitos sólidos (torta silicosa) proveniente da digestão ácida, constituídos de material inerte (sílica, alumina), ^{238}U e ^{235}U residuais e radionuclídeos de suas cadeias de decaimento; rejeitos líquidos provenientes da extração com solvente e desnitração, com volume médio de 5m^3 por tonelada de urânio processado contendo ^{238}U e ^{235}U residuais (0,2% do urânio processado) e radionuclídeos de suas cadeias de decaimento, principalmente ^{226}Ra e ^{230}Th .

Enriquecimento. Em geral, para que o urânio seja utilizado como elemento combustível em reatores de potência e pesquisa, o ^{235}U deve estar presente em teores mais elevados do que aqueles 0,7% de concentração encontrados no estado natural.

Para reatores de potência tipo LWR (Light Water Reactor) a concentração isotópica de ^{235}U deve ser da ordem de 3 a 4%. Nos reatores de alta temperatura, de alto fluxo e em reatores de pesquisa o teor de enriquecimento varia de 6 a 95% e nos reatores rápidos varia de 20 a 90%.

A etapa de enriquecimento consiste na separação isotópica do ^{238}U e ^{235}U contidos no UF_6 produzido nas etapas anteriores. Os principais processos atualmente utilizados para este fim são a difusão gasosa e a ultra-centrifugação.

Os rejeitos gerados nesta etapa são provenientes de descontaminações que se façam necessárias durante operações normais ou de manutenção. Podem ser classificados como rejeitos de baixo nível de radiação contendo radionuclídeos emissores α de meia vida longa, contendo ^{235}U e ^{238}U .

Fabricação do elemento combustível. A etapa de fabricação consiste no conjunto de operações necessárias para preparação do elemento combustível.

- transformação do UF_6 , já enriquecido isotopicamente, em UO_2 em pó;
- fabricação de pastilhas cilíndricas de UO_2 (prensagem) e posterior sinterização;
- montagem das varetas (tubo metálico de revestimento onde são inseridas as pastilhas);
- montagem do elemento combustível (conjunto de grades espaçadoras mais as varetas).

Os rejeitos gerados durante a etapa de fabricação do elemento combustível constituem-se principalmente de rejeitos sólidos, tais como luvas, sapatilhas, máscaras, papel absorvente, algodão e material de limpeza contaminados com ^{238}U e ^{235}U , gerados durante a fabricação das pastilhas.

Operação de reatores. Os rejeitos radioativos gerados durante a operação de centrais nucleares, de modo geral, têm meias-vidas curtas (< 30 anos) e baixa radiotoxicidade, produzidos por ativação neutrônica de elementos não radioativos, tais como os produtos de corrosão dos materiais estruturais ou impurezas do refrigerante, água. Além disso, podem conter produtos de fissão que escapam das varetas ou que são provenientes da fissão do urânio presente como contaminante na superfície externa do elemento combustível. Neste contexto, o ^{60}Co é o principal produto de ativação e o ^{137}Cs é o principal produto de fissão. Na tabela 8 apresenta-se alguns dados típicos sobre os rejeitos radioativos produzidos por reatores de potência tipo PWR de 1300 MWe.

Tabela 8 - Rejeitos radioativos típicos gerados em centrais nucleares (PWR de 1300 Mwe)

TIPO DE REJEITO	VOLUME (m ³ / ano)	ATIVIDADE (GBq / m ³)
REJEITOS SÓLIDOS		
CONCENTRADO DE EVAPORADOR	60	4 - 80
LAMA DE FILTROS	10	2
CARVÃO ATIVADO	2 - 10	0,4
RESINAS DE TROCA-IÔNICA	2	2000 - 8000
SÓLIDOS SECOS	130 - 200	0,4
REJEITOS LÍQUIDOS	10	400

Reprocessamento de elemento combustível. O reprocessamento tem por objetivo separar ^{235}U , ^{238}U e ^{239}Pu dos produtos de fissão contidos no elemento combustível queimado, para reutilizá-los na fabricação de novos elementos combustíveis. O processo mais utilizado é conhecido como PUREX

(Plutonium Uranium Recovery by EXtraction), que consiste no corte do elemento combustível, dissolução do mesmo em ácido nítrico (HNO_3), separação química do urânio e plutônio por extração com solvente utilizando-se tributílfosfato (TBP), purificação do urânio e plutônio recuperados e recuperação dos reagentes utilizados no processo. Durante o reprocessamento são gerados rejeitos sólidos, líquidos e gasosos.

- **sólidos** - constituem-se de materiais de segurança e limpeza, ferramentas, materiais de processo, materiais de descontaminação e manutenção, partes do revestimento (varetas do elemento combustível) não dissolvidas no processo de dissolução ácida e filtros utilizados no sistema de tratamento de gases. Estes materiais são classificados como rejeitos sólidos de baixo e médio nível de radiação, com concentração de emissores α inferior a $3,7 \times 10^8 \text{ Bq/m}^3$, exceto partes do revestimento, que são classificadas como rejeitos sólidos de alto nível de radiação. Os principais contaminantes destes rejeitos são os produtos de fissão, urânio e plutônio residuais.
- **líquidos** - estão presentes todas as classes de rejeitos radioativos com concentração de emissores α inferior a $3,7 \times 10^8 \text{ Bq/m}^3$.

Os rejeitos de alto nível de radiação são gerados na primeira fase de extração da solução, proveniente da dissolução do elemento combustível. São constituídos basicamente de ácido nítrico, contendo urânio e plutônio residuais, não extraídos, e quase a totalidade dos produtos de fissão e ativação presentes inicialmente no elemento combustível. O volume e o inventário radioquímico destes rejeitos, assim como a sua atividade específica, dependem de diversos fatores como tipo de combustível, teor de enriquecimento, fluxo de nêutrons e tempo de irradiação, tempo de resfriamento, fatores de separação do processo de extração etc.

Os rejeitos líquidos de baixo e médio nível de radiação são gerados nas etapas de purificação do urânio e plutônio, e recuperação dos reagentes usados. Eles contêm, praticamente, os mesmos radionuclídeos presentes naqueles de alto nível de radiação, porém em concentrações inferiores.

- **gasosos** - a principal etapa de geração de rejeitos gasosos é a dissolução do elemento combustível. Estes rejeitos são tratados na própria instalação, tornando-se, portanto, rejeitos sólidos (filtros) contendo principalmente ^3H , ^{14}C , ^{85}Kr e ^{129}I .

2.3 Rejeitos do descomissionamento

Descomissionamento significa o conjunto de práticas adotadas no final da vida útil de uma instalação, para inativá-la de forma segura para a saúde do trabalhador, do público em geral e do meio ambiente. Estas práticas podem variar de um simples fechamento de uma instalação com remoção mínima de materiais radioativos, a uma completa remoção da instalação, que inclui a descontaminação, desmontagem de equipamentos, desmantelamento de componentes, remoção de edificações, pavimentos e solos. Por este motivo, as características dos rejeitos radioativos gerados em um processo de descomissionamento variam muito.

3. MÉTODOS DE TRATAMENTO

O tratamento consiste em um conjunto de ações que visam a redução de volume e o condicionamento físico e químico do rejeito, objetivando compatibilizá-lo com a matriz de imobilização e com os materiais de embalagem, e reduzir os custos das etapas posteriores da gerência de rejeitos radioativos. As práticas adotadas na indústria nuclear para tratamento de rejeitos radioativos envolvem a utilização de processos já estabelecidos nas indústrias convencionais. Quando os níveis de radiação e os riscos de contaminação são significativos, são necessárias algumas adaptações, visando a implementação da segurança radiológica.

A seguir são descritos os processos de tratamento adotados para os rejeitos radioativos sólidos, líquidos e gasosos.

3.1 Rejeitos sólidos

Os principais processos utilizados para tratamento de rejeitos radioativos sólidos são: compactação, incineração, descontaminação, acondicionamento e encapsulamento.

Compactação. É um processo mecânico em que se utiliza prensas hidráulicas para diminuir o volume dos rejeitos, reduzindo os espaços vazios existentes. É comumente utilizado para rejeitos sólidos de níveis baixo e médio de atividade.

O fator de redução de volume (FRV) obtido na compactação depende da pressão aplicada e da natureza do rejeito. Cada material possui uma pressão limite de compactação, acima da qual a redução

de volume obtida não é significativa. Em geral, são obtidos valores de FRV entre 3 e 10. A otimização do FRV é obtida pela segregação adequada dos rejeitos e pela trituração ou fragmentação prévia de certos rejeitos, como botas de borracha ou recipientes de polietileno.

Há dois tipos de equipamentos utilizados na compactação: os de baixa pressão e os de alta pressão.

Os equipamentos de baixa pressão operam em pressões que variam entre 10 e 50 toneladas, atingindo FRV entre 3 e 5 sendo utilizados por geradores de pequeno e médio porte. A operação consiste em transferir os rejeitos, em geral acondicionados em sacos de papel e plástico, para a embalagem que será utilizada para transporte e armazenamento, geralmente tambor de 200 litros, e compactá-los em etapas sucessivas até que se esgote a capacidade da embalagem.

Os equipamentos de alta pressão ou supercompactadores operam com pressões entre 1000 e 2000 toneladas, atingindo FRV entre 8 e 10, sendo, por esse motivo, mais utilizados pelos geradores de grande porte; a operação é semelhante àquela descrita anteriormente.

Existe também um processo de compactação que utiliza vácuo em vez de prensas hidráulicas. Neste processo os rejeitos são recolhidos em sacos plásticos de multicamadas, especialmente fabricados para este fim, os quais são lacrados por soldagem e aos quais é aplicado vácuo. A saída do ar passa por um sistema de filtração, que evita a contaminação do ambiente. O FRV obtido é de aproximadamente 2, dependendo do tipo de material. É um processo apropriado para geradores de rejeitos radioativos ou tóxicos de pequeno porte, como hospitais, laboratórios de análise e de pesquisas.

Incineração. A incineração de rejeitos radioativos é efetuada de forma análoga à praticada nos incineradores de resíduos industriais; o processo é constituído de 4 etapas: alimentação, queima, recolhimento das cinzas e tratamento dos gases.

As principais vantagens do processo de incineração são o elevado fator de redução de volume (da ordem de 60) e redução de massa (da ordem de 20), além do fato de poder ser aplicado para vários tipos de rejeitos, como materiais de natureza celulósica, polímeros, carcaças de animais e líquidos orgânicos.

Em contrapartida, as principais desvantagens são a necessidade de sistema de tratamento de gases complexo e oneroso, investimento inicial elevado, alto custo operacional e geração de rejeitos secundários provenientes do sistema de tratamento de gases.

As vantagens e desvantagens apresentadas são genéricas e diretamente relacionadas com as características e com o volume dos rejeitos gerados.

Descontaminação. Consiste em separar o material radioativo existente na superfície de objetos contaminados, descartados como rejeito radioativo, visando reutilizar os objetos, reciclar os materiais descontaminados ou ainda descartar estes materiais como resíduo convencional, reduzindo, desta forma, o volume de rejeitos radioativos e os custos da gerência. Dentre as diversas técnicas de descontaminação utilizadas pode-se destacar:

- **processos físicos** - Baseiam-se na remoção mecânica do contaminante por meio de: aspiração a vácuo do contaminante, utilizada para contaminação removível; jateamento de água, vapor ou areia para contaminações fixas; corte com serra, arco elétrico ou plasma para remoção de áreas contaminadas restritas; e fusão do material e separação da escória contaminada, aplicável a rejeitos metálicos.
- **processos químicos** - Baseiam-se na remoção do contaminante da superfície do material contaminado utilizando soluções químicas que podem apresentar-se como: soluções orgânicas ou alcalinas, usadas para eliminar produtos de natureza graxa como resinas, óleos, ácidos graxos e lubrificantes; soluções ácidas, usadas para decapagem do material contaminado; e soluções oxidantes ou redutoras, usadas para eliminar camadas contaminantes constituídas de óxidos metálicos, que por mudança de estado de oxidação, se solubilizam e podem ser removidos.

A escolha da técnica a ser utilizada depende da natureza do material contaminado, dos radionuclídeos da camada contaminante, dos níveis de radiação e das doses operacionais resultantes, do fator de descontaminação desejado, do tempo necessário para execução do trabalho, dos custos operacionais e do volume de rejeitos secundários gerado.

Acondicionamento. É utilizado para aqueles rejeitos não compactáveis, não incineráveis, e cujas características não permitem sua descontaminação. O processo baseia-se no simples acondicionamento dos rejeitos na própria embalagem que será usada no armazenamento.

Encapsulamento. Este processo consiste em encapsular o rejeito em uma matriz sólida, em geral pasta de cimento ou concreto. É utilizado principalmente para para rejeitos sólidos não compactáveis. O encapsulamento pode ser realizado na própria embalagem de coleta ou em embalagens especialmente projetadas para este fim.

3.2 Rejeitos líquidos

Os principais processos utilizados para tratamento de rejeitos líquidos são a precipitação química, a troca-iônica e a evaporação.

Precipitação química. Empregam-se métodos da química analítica para remoção de radionuclídeos específicos ou grupo de radionuclídeos dos rejeitos líquidos de nível de atividade baixo e médio. Envolve procedimentos de ajuste de pH, adição dos reagentes selecionados para precipitação, mistura e separação do sobrenadante por filtração, decantação ou centrifugação. De acordo com as características dos radionuclídeos presentes, seleciona-se o reagente químico apropriado para promover sua precipitação.

Estes processos são mais utilizados para tratamento de grandes volumes de rejeitos contendo baixas concentrações de atividade, atingindo fatores de descontaminação entre 10 e 1000.

As principais vantagens deste processo são o baixo custo, a capacidade de tratar grande variedade de radionuclídeos e a flexibilidade para tratar volumes pequenos ou grandes. Por outro lado, as principais desvantagens são os fatores de descontaminação relativamente baixos e as dificuldades para implantação de processos de operação contínua.

Troca iônica. Baseia-se na troca entre espécies iônicas de mesmo sinal presentes em uma solução e uma matriz sólida insolúvel. No tratamento de rejeitos líquidos, os trocadores iônicos mais utilizados são os orgânicos sintéticos. São utilizados para tratamento de rejeitos de nível de atividade baixo e médio; as mais usadas são as misturas de resinas ácidas e básicas, leito misto, para remoção simultânea de cátions e ânions.

Os fatores de descontaminação obtidos com este processo são variáveis, e dependem do tipo, seletividade e capacidade do trocador, da concentração dos radionuclídeos a serem removidos, do pH e temperatura do rejeito, da velocidade do fluxo, do tamanho do leito do trocador, do potencial de saturação e da possibilidade de formação de colóides. De um modo geral, os valores médios de fatores de descontaminação obtidos variam de 10 a 10^4 .

As principais limitações do uso deste processo são: a concentração de sólidos em suspensão deve ser baixa, geralmente menor que 4 mg/litro; o teor total de sais deve ser baixo, geralmente menor que 1 g/litro; deve haver compatibilidade do trocador com a temperatura do rejeito; os radionuclídeos devem estar presentes na forma iônica.

Evaporação. Baseia-se na conversão da água presente nos rejeitos, do estado líquido para o estado gasoso, produzindo assim, uma fase destilada, que é o vapor condensado, e uma fase concentrada, que permanece com a maior parte da atividade dos radionuclídeos presentes inicialmente. Para este processo os fatores de descontaminação obtidos variam entre 10^4 e 10^5 , dependendo do tipo de equipamento utilizado. Os evaporadores utilizados na indústria nuclear são:

- **tipo caldeira** - são de construção simples e mais usados em instalações de pequeno porte. O aquecimento é feito por meio de camisa de aquecimento, utilizando vapor ou eletricidade.
- **circulação natural** - operam sob ligeira depressão. Não necessitam de equipamento mecânico para circulação do fluido, minimizando etapas de manutenção. É constituído de um calefador vertical tipo trocador de calor, por onde passa o fluido aquecedor, em geral, vapor, e o rejeito a ser evaporado.
- **circulação forçada** - empregam energia mecânica para melhorar a transferência de calor, por exemplo, bombas para recirculação de fluido, raspadores de superfície etc. Este tipo de equipamento é indicado para o tratamento de rejeitos com tendência à formação de incrustações, pois a velocidade do fluxo de rejeitos no sistema de aquecimento é mais elevada que nos evaporadores de circulação natural.

As principais limitações do processo de evaporação estão relacionadas com fenômenos de corrosão, formação de espuma e formação de depósitos ou incrustações.

3.3 Rejeitos gasosos

Os principais processos para tratamento de rejeitos gasosos são filtração e lavagem.

Filtração. Baseia-se na retenção de partículas e aerossóis em materiais permeáveis sólidos como tecidos, fibras e cerâmica. A escolha de um determinado tipo de filtro depende da granulometria do particulado e da eficiência de filtração desejada.

Em geral, em instalações nucleares, são utilizadas uma seqüência de filtros. No primeiro estágio utilizam-se pré-filtros, onde são retidas as partículas com granulometria da ordem de alguns micrometros; no segundo estágio, utilizam-se filtros HEPA (High Efficiency Particulated Air), para retenção de partículas com diâmetro de até décimos de micrometros; os filtros HEPA possuem eficiência mínima de 99,97% na remoção de partículas com granulometria de 0,3 μm .

Lavagem. Baseia-se na retenção dos aerossóis e gases em lavadores contendo soluções químicas. A retenção dos rejeitos gasosos pode ser física (retenção de aerossóis) ou química (reação química entre o gás e o líquido do lavador). A lavagem é utilizada principalmente para retenção de gases e, de acordo com as características do fluxo gasoso, são utilizados um ou mais lavadores contendo soluções e reagentes químicos específicos.

4. IMOBILIZAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO

4.1 Imobilização

Os rejeitos radioativos que, após a etapa de tratamento, não atendem ainda aos requisitos necessários para o armazenamento, transporte e disposição final, precisam ser imobilizados. Os rejeitos líquidos, os rejeitos sólidos úmidos, como resinas de troca-iônica e concentrados de evaporador, e as cinzas de incineradores fazem parte deste grupo de rejeitos.

A imobilização tem por objetivo principal fixar os radionuclídeos presentes em uma matriz sólida monolítica, a fim de se criar uma barreira contra a liberação dos mesmos para o meio-ambiente. O produto resultante desta etapa deve apresentar integridade física e estabilidade mecânica e físico-química, para garantir a segurança nas etapas subseqüentes da gerência de rejeitos.

As matrizes de imobilização mais comuns são o cimento, o betume e os polímeros. As embalagens normalmente utilizadas para acondicionar os rejeitos imobilizados são tambores metálicos com capacidade de 200 a 400 litros

A escolha de uma matriz de imobilização depende de diversos fatores, entre os quais pode-se citar sua compatibilidade química com o rejeito, sua disponibilidade comercial e seu custo, a tecnologia relacionada ao processo de imobilização e a qualidade do produto final.

As matrizes de imobilização citadas têm sido empregadas na indústria nuclear, mas cada uma apresenta algumas desvantagens ou dificuldades de emprego para certos tipos de rejeito em relação às outras, tais como: flamabilidade (betume e polímeros); baixo ponto de amolecimento (betume); endurecimento rápido (cimento); e incompatibilidade com rejeitos aquosos (polímeros). Atualmente, o cimento é a matriz mais utilizada. Tem como vantagem: a disponibilidade e o baixo custo da matéria prima; vasta experiência com cimento na engenharia civil; simplicidade de manuseio e baixo custo do processo; compatibilidade química com a maioria dos rejeitos; autoblindagem; e boa resistência mecânica. Suas desvantagens são: possibilidade de expansão ou contração; geração de calor de hidratação durante a mistura; aumento de volume e da massa do rejeito; e baixa capacidade de carga para alguns tipos de rejeitos.

4.2 Caracterização do produto final

Os rejeitos radioativos, depois de tratados e imobilizados, precisam ser devidamente caracterizados quanto à homogeneidade, permeabilidade, lixiviabilidade, resistência mecânica, resistência à radiação, resistência ao ataque químico, resistência ao ataque microbiano, resistência ao fogo e algumas outras propriedades de interesse nas etapas subseqüentes da gerência dos rejeitos, principalmente a disposição final.

No Brasil, os critérios de aceitação dos rejeitos em um repositório final estão definidos na Norma CNEN-NN-6.09: *Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação*.

4.3 Armazenamento

Armazenamento é a estocagem não definitiva dos rejeitos radioativos, já tratados e imobilizados, em local apropriado. Esta etapa permite a inspeção e a manutenção dos embalados e a reembalagem, quando necessário, para transporte à unidade de disposição final.

A capacidade do local de armazenamento deve ser adequada para a demanda e para o tempo necessário de armazenamento. Este tempo está diretamente relacionado com o estágio de desenvolvimento da construção de um repositório final: quando o repositório já está em fase operacional, o tempo é da ordem de meses; quando o repositório está em fase de construção ou mesmo em fases iniciais como de projeto ou definição de locais candidatos, pode ser de até décadas.

5. DISPOSIÇÃO FINAL

Atualmente empregam-se duas formas de se realizar a disposição final dos rejeitos radioativos: dispersão direta na biosfera, ou confinamento em repositórios. A aplicabilidade de cada uma destas opções depende do tipo e atividade dos radionuclídeos presentes no rejeito e também das características ambientais do meio receptor.

5.1 Dispersão na biosfera

Parte dos rejeitos radioativos de nível baixo podem ser eliminados diretamente no meio ambiente, quando em quantidades que assegurem que o risco à saúde humana seja inferior aos limites admitidos para o público em geral. Assim é que, em determinadas condições, gases são descartados na atmosfera, materiais sólidos no sistema de coleta de lixo urbano e líquidos na rede de esgoto ou diretamente em águas superficiais.

Este tipo de disposição se aplica aos rejeitos com nível de atividade inferior aos *Limites Autorizados de Descarga*, fixados pela autoridade competente. Estes limites são expressos em termos de atividade total ou concentração de atividade e são distintos para cada tipo de radionuclídeo e estado físico dos rejeitos. São estabelecidos com base em estudos prévios que levam em consideração a solubilidade e a diluição dos rejeitos no meio ambiente, as rotas que percorrem até chegar ao homem e as doses de radiação resultantes na população circunvizinha.

Ocorre também situações em que os rejeitos não podem ser eliminados de imediato no meio ambiente, por apresentarem atividade acima daqueles limites, mas que são compostos por radionuclídeos cujas meias-vidas são suficientemente curtas para permitir a aplicação da prática de estocagem para decaimento e posterior descarte.

A quantidade de rejeito que pode ser dispersa na biosfera, sem consulta prévia à CNEN, está definida na Norma CNEN NE-6.02 - Licenciamento de Instalações Radiativas.

5.2 CONFINAMENTO

Confinamento é o isolamento dos rejeitos radioativos por um tempo seguro ao homem, em estruturas projetadas de engenharia, denominadas de repositórios, de modo a retardar e limitar a liberação dos radionuclídeos ao meio ambiente.

Os rejeitos de nível de atividade baixo e médio são dispostos, mais freqüentemente, em repositórios de superfície ou sub-superfície. Os rejeitos de nível de atividade alto ou médio que contêm quantidades significativas de emissores α , tipicamente, o combustível queimado, alguns fluxos provenientes do reprocessamento e certos tipos de fontes seladas, são dispostos em repositórios construídos em formações geológicas profundas.

Repositórios de superfície ou sub-superfície. Os repositórios atuais deste tipo são construídos com multi-barreiras de engenharia, que garantem o isolamento adequado da maior parte dos rejeitos durante toda a vida do repositório. Três barreiras formam basicamente um sistema de repositório:

- a) o próprio embalado contendo os rejeitos - tem por objetivo transformar os rejeitos em uma forma sólida monolítica. Em alguns casos, um conjunto de embalados pode ser reembalado e imobilizado com argamassa ou concreto, a fim de se obter um único bloco monolítico com menor probabilidade de dispersão. O embalado ou conjunto de embalados consiste na primeira barreira do sistema.
- b) as barreiras de engenharia - constituem-se de um conjunto de estruturas de engenharia, em geral, concreto, onde são dispostos os embalados e objetivam, principalmente, impedir o escape dos radionuclídeos à zona insaturada do solo. Estas barreiras contam com uma cobertura impermeável para impedir a entrada de água de chuva e com um sistema de drenagem para coleta da água que, eventualmente, possa infiltrar no repositório. Além disso, são utilizados materiais de enchimento, como argila, objetivando retardar a migração dos radionuclídeos eventualmente lixiviados do embalado.
- c) o local - o meio geológico natural deve ter características favoráveis para retardar a dispersão do material radioativo.

Os repositórios de superfície com barreiras de engenharia já são utilizados há décadas em vários países e em fase de estudos para construção no Brasil.

Durante muitos anos, países como Bélgica, Inglaterra e Holanda, utilizaram a imersão a grandes profundidades no mar como alternativa de disposição para rejeitos de baixo e médio nível de atividade. Esta prática foi suspensa em 1972 até que fossem realizados mais estudos sobre o assunto; não obstante estes estudos terem demonstrado que a prática, para determinados tipos de rejeitos de atividade baixa, é segura para o homem e para o meio-ambiente, a disposição no mar é ainda hoje objeto de moratória voluntária internacional.

Outras técnicas para a disposição de rejeitos radioativos de baixa e média atividade em repositórios terrestres mais profundos também vêm sendo consideradas por alguns países. É o caso da Alemanha, que estuda o uso de minas de sal de Asse e de ferro de Konrad, e do Reino Unido, que estuda a construção de galerias subterrâneas em formações geológicas próximas ao Centro Nuclear de Sellafield.

Repositórios profundos. Este tipo de repositório é proposto para os rejeitos de alta atividade. Consiste na utilização de galerias em formações geológicas estáveis a centenas de metros da superfície. As formações geológicas, que por suas características são mais apropriadas para este fim, são as formações argilosas, graníticas e os domos salinos. Muitos estudos vêm sendo realizados na área de repositórios profundos, e muitos países já têm laboratórios instalados a grandes profundidades a fim de estudar as propriedades destes meios geológicos. Já existe suficiente conhecimento científico e desenvolvimento tecnológico para que esta técnica possa ser implantada, mas até hoje nenhum repositório deste tipo está em operação.

5. ASPECTOS LEGAIS DA GERÊNCIA DE REJEITOS

5.1 Marco legal

Existe consenso internacional de que as atividades de gerência de rejeitos radioativos devem ser conduzidas sob os princípios éticos de proteção das gerações presente e futura e de proteção ao meio ambiente. Há consenso, também, sobre a necessidade de estabelecimento de um marco legal, ou seja, um o conjunto de leis e requisitos legais subsidiários, tais como normas e regulamentos, que dê as garantias necessárias para o desenvolvimento e financiamento daquelas atividades, como também que dê garantias da continuidade e manutenção das instituições e de suas responsabilidades pelo tempo que for necessário.

A Agência Internacional de Energia Atômica estabelece a criação de uma marco legal no país, como requisito básico que precisa ser satisfeito para assegurar que a gerência dos rejeitos seja realizada com segurança.

Direito nuclear. Direito Nuclear no Brasil tem origem no dispositivo constitucional que dá competência à União Federal para legislar sobre a matéria.

A Constituição da República Federativa do Brasil estabelece:

“Art. 22. Compete privativamente à União legislar sobre:...

...XXIV - Atividades nucleares de qualquer natureza.”

A União detém também o monopólio sobre os minerais nucleares e seus derivados, conforme determina a Constituição:

“Art. 21. Compete à União:...

...XXIII - explorar os serviços de instalações nucleares de qualquer natureza e exercer o monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados, atendidos os seguintes princípios e condições:

- a) toda atividade nuclear em território nacional somente será admitida para fins pacíficos e mediante aprovação do Congresso Nacional;*
- b) sob regime de concessão ou permissão, é autorizada a utilização de radioisótopos para a pesquisa e usos medicinais, agrícolas, industriais e atividades análogas;*
- c) a responsabilidade civil por danos nucleares é independente da existência de culpa;”*

Antes da promulgação da Constituição em 1988, a atividade nuclear estava regulamentada pelas seguintes leis:

- a) A Lei 4118 de 1962, que instituiu o monopólio sobre minerais nucleares e criou a Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN.
- b) A Lei 5740 de 1971, que autorizou a criação da Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear, CBTN, pela CNEN.
- c) A Lei 6189 de 1974, que modificou as duas primeiras, mudando o nome da CBTN para Empresas Nucleares Brasileiras S/A, NUCLEBRÁS, dividiu entre a CNEN e a NUCLEBRÁS o exercício do monopólio da União e definiu as competências destes órgãos.
- d) O Decreto nº 75.569 de 07 de abril de 1975, que dispôs sobre a estrutura básica da CNEN e detalhou as atribuições dos órgãos estruturais da autarquia.
- e) A Lei 6453 de 1977, que definiu a responsabilidade civil por danos nucleares.
- f) O Decreto nº 96.620 de 31 de agosto de 1988, que instituiu o Conselho Superior de Política Nuclear.

Após a promulgação da Constituição de 1988, o Decreto nº 96.624 de 31 de agosto de 1989 alterou a competência da CNEN e a Lei 7781 de 1989 modificou a lei 6189 de 1974, dando nova redação a alguns artigos e dando outras providências. Desta destaca-se o Art. 2, que dispõe, entre outras:

“Art. 2. Compete à CNEN:...

...II - baixar diretrizes específicas para radioproteção e segurança nuclear, atividade científica-tecnológica, industriais e demais aplicações nucleares;...

...VI - receber e depositar rejeitos radioativos...

...X - expedir regulamentos e normas de segurança e proteção relativas:...

...d) ao tratamento e eliminação de rejeitos radioativos;”

Em 20 de novembro de 2001, foi promulgada a Lei Federal No. 10.308, que dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos.

Transporte de rejeitos. O transporte de rejeitos radioativos é uma questão importante do ponto de vista legal, e está tratado juntamente com o transporte de materiais radioativos de uma forma geral. No âmbito da CNEN, o assunto é regulamentado pela Norma “CNEN-NE-5.01 - Transporte de materiais radioativos”. Além disso, o transporte de substâncias tóxicas e perigosas é regulamentado pelo Ministério dos Transportes por meio do Decreto nº 96.044, de 18 de maio de 1988 “Regulamento para o transporte rodoviário de produtos perigosos” e pela Portaria do MT nº 291 de 31 de maio de 1988 “Instrução complementar ao regulamento para transporte rodoviário de produtos perigosos”. O Serviço Postal Brasileiro também impõe restrições ao transporte de materiais radioativos pelo “Regulamento do Serviço Postal”, Decreto nº 83.858 de 15 de agosto de 1979.

Licenciamento e fiscalização. Uma manifestação comum dos aspectos legais é a competência para a concessão de licenças de construção e operação de instalações, o chamado licenciamento da instalação e a sua fiscalização.

Licenciamento é o processo pelo qual a autoridade aprova o local, concede a licença de construção e autoriza a operação da instalação que manipula substâncias radioativas, incluindo-se aí, as instalações para gerenciamento de rejeitos radioativos.

As instalações radiativas e as instalações nucleares, definidas nas Normas “CNEN-NE-1.04 - Licenciamento de instalações nucleares” e “CNEN-NE-6.02 - Licenciamento de instalações radiativas” geram rejeitos radioativos. Embora seja responsabilidade da CNEN receber e depositar estes rejeitos, parte do gerenciamento é realizado na própria Instalação. Por este motivo, o gerenciamento dos rejeitos deve estar contemplado no processo de licenciamento da instalação radiativa ou da instalação nuclear.

O licenciamento de instalações radiativas e instalações nucleares é da competência da CNEN, de acordo com a Lei 6189 de 16 de dezembro de 1974, modificada pela Lei 7781 de 1989.

A aprovação de local para instalações de armazenamento de rejeitos radioativos é realizado de acordo com a Norma “CNEN-NE-6.06 - Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos”, aprovada pela Resolução 14/89 da CNEN. Além disso, os rejeitos gerados na mineração estão sujeitos aos requisitos da Resolução CNEN-07/80 que aprova a Norma “CNEN-NE-1.10 - Segurança de Sistemas de Barragens de Rejeitos contendo Radionuclídeos”.

Contudo, na área da saúde o licenciamento das instalações onde são manuseadas substâncias radioativas é da competência da autoridade sanitária, conforme Decreto 48.974-A de 21 de janeiro de 1961 - Código Nacional de Saúde e Lei 2.312 de 03 de setembro de 1954. Autoridade Sanitária é o Ministério da Saúde em articulação com as Secretarias de Saúde dos Estados.

Além disso, a Lei Federal no. 6.938/81, relativa à Política Nacional de Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto 88.351 de 01.06.83, estabelece que as atividades poluidoras ou modificadoras do meio ambiente devem ser licenciadas pelas autoridades ambientais dos governos estaduais ou, em casos especiais, pela Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA). Um dos instrumentos do licenciamento é a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA). Entre os empreendimentos que estão sujeitos a uma AIA está o processamento e destino final de resíduos tóxicos ou perigosos, conforme a Resolução CONAMA no. 001 de 23.01.86.

A fiscalização das Instalações de gerenciamento de rejeitos, pela mesma lei que estabelece a competência da CNEN para Licenciamento, é de responsabilidade deste órgão e, da mesma maneira como no Licenciamento, os estabelecimentos da área de saúde onde são manuseadas substâncias radioativas, são fiscalizados pela autoridade sanitária.

Normatização. Além dos dispositivos já citados, existe uma série de regulamentos estabelecidos pela CNEN, conforme competência definida em lei, que rege as atividade de gerenciamento de rejeitos no Brasil.

O gerenciamento de rejeitos em instalações radiativas deve cumprir com o que estabelece a Norma *CNEN-NE-6.05 - Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas*.

O transporte dos rejeitos deve ser realizado de acordo com a Norma *CNEN-NE-5.01 - Transporte de materiais radioativos*.

Todas as atividades envolvidas no gerenciamento dos rejeitos devem ser realizadas em concordância com a Norma *CNEN-NE-3.01 - Diretrizes básicas de Radioproteção*.

Além desses regulamentos, a CNEN estabelece diretrizes relacionadas direta ou indiretamente com rejeitos radioativos por meio de instruções normativas, instruções técnicas e resoluções.

6.2 Legislação internacional

A legislação internacional constitui-se de instrumentos legais de natureza bilateral ou multilateral aos quais o Brasil, ao ratificar, sujeita-se a cumprir. Estes instrumentos são criados por meio de acordos, tratados ou convenções estabelecidos com parceiros ou em foros internacionais para regulamentar uma determinada atividade. São alguns exemplos:

- a) O Tratado de Tlatelolco, que estabelece a proibição de armas nucleares na América Latina e regulamenta a posse e o uso de materiais sensíveis às salvaguardas, em que alguns tipos de rejeitos estão incluídos.
- b) A Convenção sobre Notificação de Acidente Nuclear, que obriga o país a informar sobre a ocorrência de acidente nuclear.
- c) A Convenção sobre Assistência em Caso de Acidente Nuclear ou Emergência Radiológica, que obriga a prestação de assistência, material e técnica, ao país sob emergência radiológica.
- d) A Convenção sobre Proteção Física de Material Nuclear, que estabelece regras para controle e segurança de materiais nucleares.
- e) A Convenção sobre a Prevenção de Poluição Marinha, que proíbe o despejo ou disposição de rejeitos radioativos no mar.
- f) Convenção Internacional sobre Transporte de Materiais Radioativos.
- g) Convenção Internacional sobre Rejeitos Radioativos.
- h) Tratado de Não Proliferação, do qual o Brasil é signatário.

A legislação sobre o gerenciamento de rejeitos radioativos pode ainda estar embutida ou subordinada, direta ou indiretamente, a regulamentos de natureza mais ampla, destinados a reger a atividade nuclear de modo geral, ou até mesmo outras atividades, como transporte aéreo, por exemplo. O Regulamento de Produtos Perigosos da International Air Transport Association (IATA), anexo à Resolução IATA nº. 618, define os materiais radioativos como Produtos Perigosos Classe 7 e estabelece requisitos para o seu transporte.

Por fim, é importante também citar a existência de uma série de documentos publicados por organismos internacionais, como a Agência Internacional de Energia Atômica e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica, os quais servem de base para a elaboração de regulamentos e normas para a gerência de rejeitos em cada país. A importância desta lista reside, principalmente, no fato de que a CNEN eleva estes documentos à categoria de regulamentos para os casos em que inexistente normatização brasileira adequada (IN-001/94 - Certificação do atendimento aos requisitos de segurança e radioproteção pelas instalações nucleares e pelas instalações radiativas da CNEN).

7. PANORAMA DOS REJEITOS RADIOATIVOS NO BRASIL

O Brasil não possui rejeitos radioativos de atividade alta, visto que elementos combustíveis queimados não são classificados como tal até que se defina uma política nacional de processamento, reprocessamento ou simples descarte deste combustíveis, atualmente armazenados nos próprios reatores onde foram queimados. Todos os rejeitos existentes no país são portanto classificados como sendo de atividade baixa ou intermediária.

7.1 Depósitos temporários

Os rejeitos institucionais e os do ciclo do combustível nuclear estão sendo atualmente armazenados nas unidades administradas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear e na Central Nuclear de Angra dos Reis, nos seguintes locais:

- **No Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**, em São Paulo, onde são tratados os rejeitos gerados no próprio instituto e aqueles recolhidos de hospitais, clínicas, indústrias, universidades e centros de pesquisa localizados principalmente na região sul do país, além do Estado de São Paulo.
- **No Instituto de Engenharia Nuclear**, no Rio de Janeiro, onde são tratados os rejeitos gerados no próprio instituto e aqueles recolhidos de hospitais, clínicas, indústrias, universidades e centros de pesquisa localizados no Estado do Rio de Janeiro.
- **No Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear**, em Belo Horizonte, onde são tratados os rejeitos gerados no próprio instituto e aqueles recolhidos de hospitais, clínicas, indústrias, universidades e centros de pesquisa localizados nos demais estados brasileiros.
- **Na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto**, em Angra dos Reis, onde estão armazenados os rejeitos gerados na própria usina.
- **No Complexo Industrial de Poços de Caldas**, onde estão armazenados os rejeitos gerados na purificação de concentrados de urânio e tório.
- **Nos depósitos da antiga Usina Santo Amaro**, já desativada, em São Paulo e Botuxim (SP), onde estão armazenados os rejeitos gerados na purificação de terras raras extraídas da monazita.

7.2 Repositório final de Abadia - GO

Os rejeitos provenientes do acidente radiológico de Goiânia constituem-se em um caso particular, já definitivamente solucionado. Foi construído um repositório em Abadia de Goiás (GO) para receber as cerca de 4.000 toneladas de rejeitos, com atividade de 40 TBq, que foram gerados na descontaminação das áreas atingidas pelo acidente. Os tambores contendo os rejeitos estão colocados dentro de blocos de concreto, cobertos com terra e vegetação, de modo a evitar o seu contacto com a biosfera. Apesar dos riscos ambientais insignificantes associados a solução adotada, a Comissão Nacional de Energia Nuclear mantém um controle constante do repositório e do meio ambiente circunvizinho.

8. REJEITOS RADIOATIVOS NO IPEN

O IPEN recebe, trata e armazena os rejeitos radioativos produzidos em suas próprias instalações, bem como aqueles gerados em instituições da área de saúde, industrial e pesquisa. Conta com uma Unidade Integrada para Tratamento e Armazenamento de Rejeitos Radioativos, composta de laboratórios para recepção e segregação de rejeitos; descontaminação; tratamento, imobilização e

acondicionamento de rejeitos líquidos; compactação de sólidos; desmantelamento de pára-raios radioativos; desmontagem de fontes seladas; e laboratórios químico e radiométrico para caracterização primária e final dos rejeitos. Conta também com 2 galpões de 200 m² de área construída cada, um para armazenamento dos rejeitos não tratados e outro para armazenamento dos rejeitos tratados.

Recebe, anualmente, aproximadamente 700 fontes radioativas seladas de indústrias e hospitais, 1000 pára-raios radioativos e 2000 detetores de fumaça em atendimento ao público em geral e da ordem de 100 m³ de rejeitos sólidos compactáveis das instalações do próprio ipen. Em menor quantidade, recebe também rejeitos líquidos e biológicos.

O inventário atual dos rejeitos radioativos armazenados no IPEN é composto principalmente de:

Rejeitos sólidos e líquidos tratados:	270 m ³ , com aproximadamente 200 toneladas
Fontes seladas em desuso:	8.300 unidades
Pára-raios radioativos:	13.000 unidades
Detores de fumaça:	14.000 unidades

A atividade total armazenada é de aproximadamente 1.800 TBq (da ordem de 50.000 Ci).

A unidade de pára-raios está operando com uma capacidade de desmantelamento de aproximadamente 2000 peças por ano, e a unidade de desmontagem de fontes seladas tem previsão de início das atividades operacionais até o final do ano de 2003.

O IPEN mantém também um programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico na área de caracterização, tratamento e disposição final de rejeitos radioativos, além das atividades de ensino na pós-graduação, graduação e extensão.

Nota: Texto extraído e adaptado de “Introdução à gerência de rejeitos radioativos”. G.Hiromoto, J.C.Dellamano, J.T.Marumo, L.S.Endo, R.Vicente e T.Hirayama. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Departamento de Rejeitos Radioativos. São Paulo, 1999.