

# **Salvaguardas nas Instalações de Enriquecimento da Argentina e do Brasil**

**Marco A. Marzo**  
**Oficial de Planejamento e Avaliação**

**Apresentado no Seminário “ABACC: Cinco Anos Aplicando Salvaguardas”  
Rio de Janeiro - 10 de Outubro de 1997**

## **Introdução**

Desde o início de suas atividades, em meados de 1992, uma das principais questões da Secretaria da ABACC foi como aplicar salvaguardas a duas pequenas instalações de enriquecimento de urânio, uma de difusão gasosa - a Planta de Enriquecimento de Urânio de Pilcaniyeu - e a outra de centrifugação - o Laboratório de Enriquecimento Isotópico (LEI) no Brasil.

A fim de cumprir com seus objetivos face aos acordos de salvaguardas existentes (Bilateral e Quadripartite), a ABACC deve aplicar salvaguardas a essas instalações sensíveis de modo efetivo e eficiente. De outra parte, um condição de contorno básica é o direito do País proteger informações que julgue ser sensível do ponto de vista tecnológico ou comercial ou industrial. Estas duas condições, em geral contraditórias, tornam complexo o desenvolvimento e aplicação de um enfoque de salvaguardas a ambas instalações.

A preocupação com esse tema já fora manifestada pelos dois países antes mesmo da entrada em vigor do Acordo Bilateral, e portanto da criação da ABACC. Assim, em meados de 1991 foi criado um grupo técnico com especialistas dos dois países nas áreas de salvaguardas e de enriquecimento de urânio para preparar um enfoque de salvaguardas para as duas instalações. Após a criação da ABACC, esse grupo tornou-se um grupo Assessor da Comissão da ABACC para instalações sensíveis. A responsabilidade pelo desenvolvimento e implementação de um enfoque de salvaguardas passou à Secretaria da ABACC.

As duas instalações têm pequena capacidade de trabalho separativo e foram preparadas principalmente com finalidade de desenvolvimento, e, portanto, não têm um caráter estritamente comercial de produção. Analisando a aplicação de salvaguardas em outras instalações de enriquecimento no mundo, observa-se que ainda não há enfoque de salvaguardas bem definido para plantas de difusão gasosa. Para plantas de centrifugação comerciais tem sido aplicado o enfoque denominado “hexapartite”, no entanto também não há um enfoque de salvaguardas específico para plantas de centrifugação de pequena capacidade.

Esta apresentação descreve os objetivos das salvaguardas para as duas instalações, as principais características das instalações que influenciam o enfoque de salvaguardas e os principais cenários de desvio. Em seguida apresenta-se o estado atual da implementação das salvaguardas na Planta de Pilcaniyeu e no LEI.

## **Objetivos das Salvaguardas**



Os objetivos básicos das salvaguardas são detetar o desvio de quantidades significativas de material nuclear e verificar que a instalação está operando conforme o informado. Em geral para instalações de enriquecimento, os objetivos das salvaguardas são:

- (a) verificar que o inventário material nuclear e suas variações, e a operação da instalação são como informados pelo operador; e
- (b) verificar que a instalação não está sendo usada para produzir urânio enriquecido de modo não declarado.

Considerados os objetivos gerais, estabelecem-se metas de salvaguardas específicas, que variam conforme o tipo e tamanho da instalação.

### Características das Instalações de Enriquecimento por difusão e por centrifugação

A Tabela I resume algumas características dos dois tipos de instalações, que são relevantes para as salvaguardas.

Tabela I: Principais características das instalações de enriquecimento por difusão gasosa e centrifugação para as salvaguardas

|                                                                                                                                   | <b>Difusão Gasosa</b>            | <b>Centrifugação</b>          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Material nuclear                                                                                                                  | UF6                              | UF6                           |
| fator de separação                                                                                                                | ~ 1.004                          | 1.2 - 1.6                     |
| inventário em processo                                                                                                            | ordem de tons<br>(~10% do fluxo) | ordem de kg<br>(~0.02% fluxo) |
| Inventário específico (kg U/UTS/ano)                                                                                              | 0.1 - 0.3                        | ~ 0.0005                      |
| fluxo                                                                                                                             | alto                             | baixo                         |
| Consumo específico de energia (kWh/UTS)                                                                                           | 2300 - 3000                      | 100 - 300                     |
| Módulos em paralelo                                                                                                               | não                              | sim                           |
| Mecanismo de refluxo em estágio                                                                                                   | nenhum                           | sim                           |
| - Número de estágios (cascata ideal) para produzir urânio enriquecido a 3% a partir de urânio natural com rejeitos a 0,2%;        | ~1400                            | ~50                           |
| - tempo de equilíbrio                                                                                                             | meses                            | horas                         |
| - Numero de estágios (cascata ideal) para produzir urânio enriquecido a 20% a partir de urânio enriquecido a 3% com rejeitos a 1% | ~1600                            | ~60                           |
| - tempo de equilíbrio                                                                                                             | ~ 1 ano                          | horas                         |

Observa-se, em especial, que o numero de estagios para produzir urânio de baixo enriquecimento (LEU) é aproximadamente 30 vezes maior na planta de difusão que na de centrifugação. O tempo de equilíbrio é significativamente maior em plantas de difusão

(meses) que nas plantas de centrifugação (horas). Este efeito, que é ainda mais intenso quando as plantas operam com altos enriquecimentos, torna mais difícil qualquer alteração no modus operandi de uma planta de difusão gasosa.

O grande inventário em processo de plantas de difusão (poucas toneladas em uma planta de pequena escala) indica a importância do fechamento do balanço de material nesse tipo de instalação. Por outro lado, para plantas de centrifugação, o pequeno tempo de equilíbrio, o pequeno inventário em processo e a flexibilidade para se alterar o projeto da cascata (paralelo para série) determina a importância de verificar que a planta está operando como informado pelo operador.

Para fins de salvaguardas, uma consequência importante advém das diferenças entre os dois tipos de plantas:

- em plantas de centrifugação, o enfoque de salvaguardas deve ter como elemento chave inspeções não anunciadas ou mecanismo equivalente com o objetivo de confirmar a operação da planta;
- para plantas de difusão gasosa, o enfoque de salvaguardas deve se basear principalmente em inspeções anunciadas para verificar o balanço de material. Em ambos os casos, como medida complementar, pode-se aplicar sistemas de vigilância para verificar o fluxo de material nuclear entre o depósito e a área de processo

### **Enfoque de Salvaguardas para a Planta de Difusão Gasosa de Pilcaniyeu**

Apresentam-se os principais cenários de desvio de material nuclear ou de mau uso da instalação e discute-se um enfoque de salvaguardas para a planta de difusão gasosa de pequena capacidade.

A Tabela II resume os principais cenários de desvio ou estratégias de operação não informada associadas à planta de difusão gasosa de Pilcaniyeu.

A produção não declarada de urânio de baixo enriquecimento é o cenário mais importante a ser considerado e isto implica que os compromissos de salvaguardas deveriam ser violados em outra instalação. A estratégia seria a seguinte:

- a subestimativa da capacidade de operação, usando a capacidade de trabalho separativo adicional para processar material não declarado, ou
- a operação durante uma alegada parada da instalação.

Em plantas de difusão gasosa, no entanto, é difícil de esconder ou modificar a capacidade da planta e é fácil de se reconhecer seu estado de operação, dado o ruído e a temperatura.

O cenário de produção de urânio altamente enriquecido (HEU) pode ser considerado automaticamente coberto já que a produção de HEU exige o preenchimento da cascata com LEU (algumas toneladas) e que se atinja um novo equilíbrio (cerca de um ano). Além disso, nem reciclagem de lote (no mínimo três vezes) nem operação em



Table II. Análise de cenários de desvio de material nuclear e de estratégia de operação não informada para a planta de difusão gasosa de Pilcaniyeu

| <b>Cenários de desvio/operação não informada</b>                        | <b>Método de Encobrimento</b>                                                                                                                                                                 | <b>Medidas de Salvaguardas</b>                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.- Desvio de urânio declarado                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoção e substituição com urânio natural ou empobrecido ou outro material;</li> <li>- Desvio dentro do MUF;</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificação de cilindros de UF<sub>6</sub> com alimento, produto e rejeito;</li> <li>- Encerramento do balanço de massa de U e de U<sup>235</sup> durante o PIV.</li> </ul>                                                                         |
| 2.- Produção não declarada de LEU; alimentando com urânio declarado     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Substituição do material com falsificação de dados operacionais e de contabilidade;</li> <li>- Superestimativa do inventário em processo.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- idem a (1)</li> <li>- Contenção e vigilância ao sistema de alimentação e retirada;</li> <li>- Comparação entre dados de alimento, produto e rejeito e dados operacionais.</li> </ul>                                                                |
| 3.- Produção não declarada de LEU; alimentando com urânio não declarado | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Subestimativa da capacidade de operação;</li> <li>- Operação durante paradas informadas da instalação</li> </ul>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Comparação entre dados de alimento, produto e rejeito e dados operacionais.</li> <li>- Acesso à área da cascata para confirmar estado operacional da instalação;</li> <li>- Contenção e Vigilância ao sistema de alimentação e retirada.</li> </ul> |
| 4.- Produção de urânio altamente enriquecido (HEU)                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alimentação com LEU</li> <li>- Reciclagem por lote;</li> <li>- Operação em refluxo;</li> <li>- Capacidade separativa não declarada.</li> </ul>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Idem a (3)</li> <li>- Amostragem de correntes de alimento, produto e rejeito;</li> <li>- Uso de sistema NDA do tipo sim ou não;</li> <li>- Amostragem ambiental.</li> </ul>                                                                         |

refluxo para a produção de HEU constituem cenários críveis dado o longo intervalo de tempo envolvido. A estratégia de desvio de material dentro do material não contabilizado (MUF) é relativamente limitada, já que o valor do MUF em uma planta de pequena capacidade não deveria ser muito relevante.

O enfoque de salvaguardas para uma planta de difusão de pequena capacidade engloba contabilidade, contenção e vigilância, e atividades de inspeção, que incluem certa verificação das informações sobre o projeto. Considerando os objetivos das salvaguardas para esse tipo de planta, pode-se estabelecer uma frequência de inspeções anunciadas, que consistem de uma verificação anual do inventário físico e algumas inspeções intermediárias. É importante frisar que as condições de operação da instalação não podem ser facilmente modificadas para restabelecer condições do processo antes de uma inspeção anunciada, e nem a operação pode ser facilmente reiniciada após uma parada da planta.

Essas atividades deveriam ser complementadas por um sistema de contenção e vigilância para confirmar que apenas cilindros de alimentação previamente verificados são conectados ao sistema de alimentação e retirada.



Amostras poderiam ser coletadas nas correntes de alimentação, de produto e de rejeito para confirmar que o enriquecimento está dentro do intervalo declarado. Um sistema de medidas do tipo “go/no go” poderia ser usado para confirmar que o nível de enriquecimento não excedeu um dado valor. Com o mesmo propósito, amostras ambientais poderiam ser coletadas (esfregaço), apesar de que nesse caso os resultados são obtidos com um atraso considerável. A continuidade da tubulação entre o sistema de alimentação e retirada deveria ser verificado e o tamanho da planta (numero de módulos) deveria ser periodicamente reconfirmado.

Atualmente, como a Planta de Enriquecimento de Pilcaniyeu encontra-se parada para obras de ampliação, a ABACC vem aplicando um sistema “ad-hoc” de inspeções anunciadas com o objetivo de verificar o inventário de material nuclear e confirmar que a instalação não está operando.

### **Enfoque de Salvaguardas o Laboratório de Enriquecimento Isotópico (LEI)**

Apresentam-se os principais cenários de desvio de material nuclear ou de mau uso da instalação e discute-se um enfoque de salvaguardas para o LEI.

De um ponto de vista de salvaguardas as principais características do LEI que influenciam um enfoque de salvaguardas são:

- (a) pequeno tempo de equilíbrio;
- (b) flexibilidade de modificações no projeto da instalação, e, conseqüentemente, em sua operação;
- (c) pequeno inventário de material nuclear da instalação, especialmente do inventário em processo;
- (d) utilização de material de alimentação de diversos enriquecimentos (urânio natural, empobrecido e enriquecido);
- (e) tempo relativamente pequeno para produção de HEU a partir de LEU;
- (f) impossibilidade de observação visual da cascata, a qual é coberta por painéis, já que o operador quer proteger informações sensíveis.

O ponto (c) torna relativamente de menor importância o cenário de desvio de material nuclear declarado. Todos os outros pontos tornam difícil a confirmação de que a planta opera conforme o informado. Além disso, deve-se acrescentar que o operador considera informação sensível o valor da capacidade de trabalho separativo de cada centrífuga e de cada cascata.

A Tabela III resume os principais cenários de desvio ou estratégias de operação não informada associadas ao LEI.

Considerando a flexibilidade da instalação, o cenário de produção não declarada de LEU ou HEU é o mais importante a ser considerado. Sendo pequena a capacidade da instalação, a única possibilidade de produzir HEU é alimentando com LEU (e reciclagem seria necessária para produzir uma quantidade significativa de HEU). O cenário de desvio de material declarado não é relevante, tomando-se em consideração as pequenas quantidades envolvidas.



Tabela III. Análise de cenários de desvio de material nuclear e de estratégia de operação não informada para uma planta de centrifugação de pequena capacidade

| <b>Cenários de desvio/operação não informada</b>                                                           | <b>Método de Encobrimento</b>                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Medidas de Salvaguardas</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.- Desvio de urânio declarado                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoção e substituição com urânio natural ou empobrecido ou outro material;</li> <li>- Desvio dentro do MUF;</li> </ul>                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificação de cilindros de UF<sub>6</sub> com alimento, produto e rejeito;</li> <li>- Encerramento do balanço de massa de U e de U<sup>235</sup> durante o PIV.</li> </ul>                                                                                                                                           |
| 2.- Produção não declarada de LEU; alimentando com urânio declarado                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Substituição do material com falsificação de dados operacionais e de contabilidade;</li> </ul>                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- idem a (1)</li> <li>- Contenção e vigilância ao sistema de alimentação e retirada;</li> <li>- Comparação entre dados de alimento, produto e rejeito e dados operacionais.</li> </ul>                                                                                                                                  |
| 3.- Produção de LEU, alimentando com urânio não declarado                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Subestimativa da capacidade de operação</li> <li>- Operação durante paradas informadas da instalação;</li> <li>- Existência de sistema de alimentação e retirada clandestino;</li> <li>- Existência de tubulações clandestinas;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificação de cilindros com alimento, produto e rejeito;</li> <li>- Contenção e vigilância ao sistema de alimentação e retirada;</li> <li>- Verificação da inexistência de linhas clandestinas penetrando no sistema de alimentação e retirada ou na área das cascatas, durante inspeções não anunciadas;</li> </ul> |
| 4.- Produção de LEU ou HEU, processando material não declarado; alimentação e retirada dentro dos painéis. | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cilindros de UF<sub>6</sub> e sistema de alimentação e retirada são escondidos dentro dos painéis;</li> <li>- Cascatas são conectadas em série;</li> <li>- Reciclagem dentro dos painéis.</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Controle de perímetro (contenção, vigilância e medidas de transmissão);</li> <li>- Verificação de que as cascatas não estão conectadas em série durante inspeções não anunciadas;</li> <li>- Amostragem ambiental.</li> </ul>                                                                                         |

Um enfoque de salvaguardas do tipo “hexapartite”, que se baseia em verificar que a instalação opera conforme o declarado, através de inspeções não anunciadas (o acesso de inspetores à área da cascata deve se dar em um prazo máximo de 2 horas), não pode ser aplicado ao LEI dada à existência de painéis cobrindo as cascatas não permite concluir que a instalação opera conforme o declarado. Como alternativa efetiva apresenta-se o enfoque de salvaguardas baseado em controle de perímetro. Nesse enfoque todas as penetrações à área de cascata (portas, janelas, tubulações, etc), através



das quais é concebível a introdução/retirada de quantidades importantes de material nuclear são mantidas sob contenção e/ou vigilância. Caso seja necessário transferir para a área da cascata um “container” (p. ex. Uma caixa contendo uma centrífuga), um método NDA é aplicado para assegurar que o “container” não contém material nuclear. Entradas e saídas desses “containers” devem ser previamente comunicadas. O conceito de controle de perímetro tem portanto um forte impacto negativo nas condições de trabalho do operador. Além disso, dada a possível necessidade de presença frequente de inspetores na instalação, o custo das salvaguardas deve ser elevado.

Em caso de falha no sistema de contenção e vigilância, deve-se assegurar que não há material nuclear acumulado atrás dos painéis. Com essa finalidade a ABACC em cooperação com a IAEA, e com o apoio da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e do Centro Tecnológico da Marinha de São Paulo (CTMSP), está desenvolvendo um método utilizando medidas gama e de neutrons.

O operador desejou preservar as principais características e estado de desenvolvimento das centrífugas, cobrindo-as com painéis. Com o mesmo objetivo o operador não fornece o teor em U-235 dos cilindros conectados ao processo e não permitem aos inspetores confirmar que cilindro está conectado a cada estação de alimentação e retirada, e nem permite confirmar suas massas pela observação da indicação das células de carga. Um sistema especial para a verificação de tais cilindros está sendo usado pela ABACC durante inspeções anunciadas. O mesmo sistema está sendo usado pela ABACC durante inspeções não anunciadas que englobam as estações de alimentação e retirada. Em uma primeira fase a introdução do controle de perímetro não altera esta situação. Em um estágio posterior, com o uso de um adequado sistema de contenção e vigilância, o procedimento se limitaria ao exame de selos e filmes..

A fim de assegurar que as cascatas estão operando em paralelo, e não em série, e de que não há penetrações clandestinas à área das cascatas, inspeções não anunciadas são realizadas a essa área. Esta situação não se modificaria mesmo com a aplicação do controle de perímetro.

## **Conclusões**

Um enfoque de salvaguardas para planta de difusão gasosa de pequena capacidade pode ser satisfatoriamente desenvolvido. O principal elemento do enfoque é a realização de inspeções anunciadas para verificação do inventário e de suas variações. Para fechar o balanço de material nuclear é importante a determinação do inventário em processo, que é feita utilizando-se um método NDA. Medidas de contenção e vigilância ao sistema de alimentação e retirada podem ser aplicadas para assegurar que a planta só é alimentada com material previamente verificado. Apesar de que uma planta de difusão de pequena capacidade não é conveniente para a produção de urânio altamente enriquecido, poderia se detectar indiretamente a produção de HEU controlando a alimentação da planta, e diretamente pela amostragem das correntes de alimento, produto e rejeito. Aplicação de um sistema do tipo “go/no go” poderia ser usado para confirmação adicional de que o enriquecimento está dentro do intervalo declarado. Amostragem ambiental também poderia ser usada para esse propósito, apesar de que nesse caso a conclusão se daria com considerável atraso. Não há cenário crível que justifique a realização de inspeções não anunciadas.

Para o LEI a perda de transparência devido à existência dos painéis origina um cenário importante, que é a possível alimentação e retirada atrás dos painéis. Como

solução, a ABACC propôs a introdução de controle de perímetro, para assegurar que o apenas material nuclear previamente verificado atinge a área de processo (estações de alimentação e retirada e área das cascatas). O enfoque de controle de perímetro pode ser aplicado efetivamente, mas tem impacto negativo para o operador e, em geral, apresenta custo elevado. A resolução de anomalias em caso de falha do controle de perímetro requer a aplicação de medidas NDA na área das cascatas. Inspeções não anunciadas permanecem com uma ferramenta fundamental para cobrir vários outros cenários de mau uso da instalação. Como no caso da difusão gasosa, amostragem ambiental também poderia ser usada para confirmação adicional de que o enriquecimento está dentro do intervalo declarado, apesar de que nesse caso a conclusão se dá com considerável atraso.

Finalmente, no contexto do desenvolvimento de novas tecnologias de salvaguardas, com a utilização de sistemas remotos, inspeções não anunciadas poderiam ter um papel importante para confirmar que tais sistemas estão funcionando adequadamente.