

ANÁLISE DE RISCO EM INSTALAÇÕES DE ENRIQUECIMENTO ISOTÓPICO DE URÂNIO

José Messias de O. Neto - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN
Adelaide Cássia Nardocci - Internacional de Engenharia S/A - IESA
Peter Franz Woiblet Jr. - Empresa Gerencial de Projetos Navais - EMGEPRON

RESUMO

Um método para análise de risco em instalações nucleares de enriquecimento isotópico é apresentado. Sua aplicação a uma planta de enriquecimento por ultracentrifugação é demonstrada. Os principais eventos possíveis de ocorrer na instalação são identificados e classificados. As consequências desses eventos são analisadas considerando-se os efeitos tóxico-químicos e radiológicos.

INTRODUÇÃO

O risco associado à operação de uma planta de enriquecimento isotópico de urânio está essencialmente ligado ao hexafluoreto de urânio[UF₆] que é um composto tóxico, radioativo e altamente reativo com várias substâncias.

O UF₆ quando liberado para a atmosfera, reage rapidamente com a umidade de ar produzindo fluoreto de urânila[UO₂F₂] e ácido fluorídrico[HF]. O UF₆ e o UO₂F₂ exibem toxicidades química e radiológica, enquanto que o HF apresenta apenas toxicidade química. Indivíduos expostos a estas substâncias podem sofrer efeitos biológicos dependendo do tempo de exposição, das concentrações envolvidas etc. O confinamento adequado do UF₆ é, portanto, um dos principais requisitos de segurança em instalações de enriquecimento.

Apresenta-se, neste trabalho, uma análise preliminar de risco de uma instalação de enriquecimento de pequeno porte. O método de análise assemelha-se ao da Ref. [1], proposto para instalações químicas convencionais. Foram incluídos meios para permitir uma avaliação conjunta das consequências tóxico-químicas e radiológicas de eventos envolvendo vazamentos de UF₆ para o meio ambiente. O método inclui também um procedimento para classificação de eventos.

MÉTODO DE AVALIAÇÃO

O procedimento de análise segue os seguintes passos principais:

- 1) *Divisão da instalação em unidades/áreas convenientes.*
Ex.: Área de cascatas; estocagem de UF₆; alimentação das cascatas etc.
- 2) *Identificação dos componentes de cada unidade.*
Ex.: Ultracentrifugas; cilindros de transporte; tubulações etc.
- 3) *Caracterização do inventário dos componentes.*
Identifica substâncias perigosas presentes nos sistemas e equipamentos. Inclui propriedades tóxico-químicas, radiológicas e condições operacionais das substâncias.

- 4) *Agrupamento dos componentes por inventário.*
Seleciona componentes com inventários mais significativos de substâncias perigosas.
- 5) *Identificação dos tipos de falha de cada componente.*
Ex.: Vazamento; ruptura de tubulação ou válvula etc
- 6) *Classificação dos casos de liberação.*
Agrupa casos similares e efetua cálculo para a condição mais desfavorável.
- 7) *Casos especiais.*
Avalia atendimento a requisitos de segurança contra criticalidade nuclear e incêndio.
- 8) *Avaliação dos termos-fonte.*
Calcula quantidades liberadas para o interior da planta e para o meio ambiente. Considera a atuação de sistemas de segurança [confinamentos, filtros etc].
- 9) *Avaliação das consequências.*
Efetua cálculos de dispersão atmosférica, exposição e incorporação de substâncias radioativas e tóxicas, avalia danos à saúde do homem e impacto ao meio ambiente.
- 10) *Avaliação das frequências de ocorrência dos eventos postulados.*
Desenvolve árvores de falha e de eventos, calcula frequências
- 11) *Interpretação dos resultados.*
Com base nos passos 9 e/ou 10, identifica riscos potenciais.
- 12) *Medidas Mitigadoras*
Examina a necessidade de medidas mitigadoras; apresenta sugestões para minimizar ou eliminar riscos potenciais.

DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

O presente trabalho, analisa a segurança de uma instalação de pequeno porte para enriquecimento isotópico de urânio, e destinada ao desenvolvimento da tecnologia de

ultracentrifugação gasosa. A instalação possui apenas 120 ultracentrifugas e o enriquecimento máximo de operação é fixado em 3,2%. Os dados de projeto necessários à análise foram extraídos do Relatório Preliminar de Análise de Segurança da instalação[2].

A Figura 1 mostra um diagrama esquemático da instalação, que pode ser dividida funcionalmente nas seguintes áreas ou sistemas principais: Cascata; Alimentação de UF₆; Retirada de UF₆ enriquecido e empobrecido. Existem vários outros sistemas auxiliares, mas na presente análise são considerados apenas os de ventilação e combate a incêndio.

A instalação opera com cilindros do tipo 48Y [14 t] e 30B [2,4 t], e não possui área de estocagem.

DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS

Sistema de cascata: Seus principais componentes são as ultracentrifugas, tubulações de interconexão e válvulas de isolamento. O sistema é mantido a uma pressão que varia entre 4 e 30 mbar e o inventário de UF₆ gasoso é da ordem de 0,5 kg. **Sistema de alimentação:** Possui aquecedores a ar que elevam a temperatura do UF₆ natural a 54,4 °C [930 mbar] sem, entretanto liquefazê-lo. O fluxo de UF₆ é da ordem de 2 g/s. O sistema tem capacidade para dois cilindros do tipo 48Y, sendo um de espera.

Sistema de retirada de produto: Tem a função de recolher o UF₆ enriquecido proveniente da cascata a uma vazão de 0,26 g/s. O sistema possui três estações coletoras, cada uma com dois dessublimadores [primário e secundário]. A maior parte do UF₆ proveniente da cascata fica retido no dessublimador primário mantido a -73 °C, o restante é recolhido no dessublimador secundário, mantido a -187 °C. O dessublimador é desconectado da cascata quando a sua carga atinge 136 kg de UF₆. Em seguida, ele é aquecido até 80 °C, liquefazendo o UF₆, que é transferido por gravidade para um cilindro 30B de transporte. Os cilindros cheios são transportados para outro local pois a instalação não possui área de armazenamento.

Sistema de retirada de rejeito: Tem a função de recolher UF₆ empobrecido proveniente da cascata. Possui as mesmas características funcionais que o sistema de retirada de produto. Opera com uma vazão de UF₆ de 1,45 g/s, e com cilindros 48Y.

Sistema de ventilação e ar condicionado: Destinado a manter controle ambiental das áreas de processo. Em condições acidentais o sistema é desligado e as áreas de processo são isoladas de modo a confinar a liberação de UF₆ dentro da instalação.

Sistema de combate a incêndio: Distribuído pela planta para dar combate imediato a incêndios .

APLICAÇÃO DO MÉTODO

RESUMO

A divisão da instalação em unidades funcionais, ilustrada na Fig. 1, identifica quatro áreas principais que abrigam o sistema de alimentação, os sistemas de retirada e a cascata. Os componentes de interesse para a análise são listados na Tabela 1, onde se indica também os modos de falha mais representativos. A Tabela 2 relaciona os componentes presentes em cada unidade funcional e lista as condições operacionais do UF₆.

A instalação utiliza várias substâncias químicas tais como, nitrogênio líquido para os dessublimadores secundários, óleo Fomblim nos sistemas de vácuo, solventes etc. Estas substâncias, estão presentes em pequenas quantidades e não possuem características perigosas.

O UF₆, por ser uma substância quimicamente reativa, tóxica e radioativa, deve ser manipulado e processado de acordo com vários requisitos de segurança[3]. Eventos envolvendo a liberação de UF₆ podem acarretar danos à saúde e contaminar o meio ambiente.

A liberação acidental de UF₆ pode ser iniciada por um evento externo [sismo, queda de avião, enchente, tornado] ou por um evento interno [falha em sistema ou equipamento, incêndio, criticalidade nuclear]. Este assunto é discutido com algum detalhe na Ref. [4]. O presente trabalho analisa apenas eventos internos iniciados por falhas em sistemas e componentes da instalação.

Tabela 1 :Componentes da Planta

componente	categoria	modos de falha
ultracentrifuga	1	quebra de rotor
cilindro de transporte	2	quebra de válvula
tubulação de UF ₆	3	ruptura total
dessublimadores	4	ruptura tubulação
conexões flexíveis	5	ruptura total

Tabela 2 :Unidades da planta e seus componentes

Área	unidade	componentes	condições do UF ₆
A1	Cascata	1,3,5	gasoso subpr.
A2	Alimentação	2,3,5	sólido;gasoso subpr.
A3	Retirada de U enriquecido	2,3,4,5	líquido pressurizado. enriq. 2,3%
A4	Retirada de U empobrecido	2,3,4,5	líquido pressurizado. enriq. 0.3%

EVENTOS ANALISADOS

O UF₆ processado na instalação pode ser encontrado no estado sólido dentro dos cilindros 30B e 48Y; no estado gasoso subpressurizado, nas ultracentrifugas e tubulações da cascata; e no estado líquido, nos dessublimadores.

Considerando-se as características do processo utilizado, uma liberação acidental de UF₆ pode ser iniciada pela falha de um dos seguintes componentes da instalação: válvula de um cilindro, tubulação da cascata; conexões flexíveis; dessublimadores.

Os principais cenários de vazamentos identificados no interior da instalação são descritos abaixo:

1-Falha no sistema de alimentação de UF₆.

Supõe-se ocorrer ruptura completa da conexão flexível que liga o cilindro 48Y que alimenta a cascata. Admite-se que a vazão operacional do sistema permanece inalterada por um período de 15 minutos, resultando na liberação de 1,8 kg de UF₆ para a área A2 de alimentação.

2-Liberação total do UF₆ da cascata

Considera-se ocorrer uma falha de grande porte nas tubulações da cascata, resultando na liberação de 0,5 kg de UF₆ para a área A1.

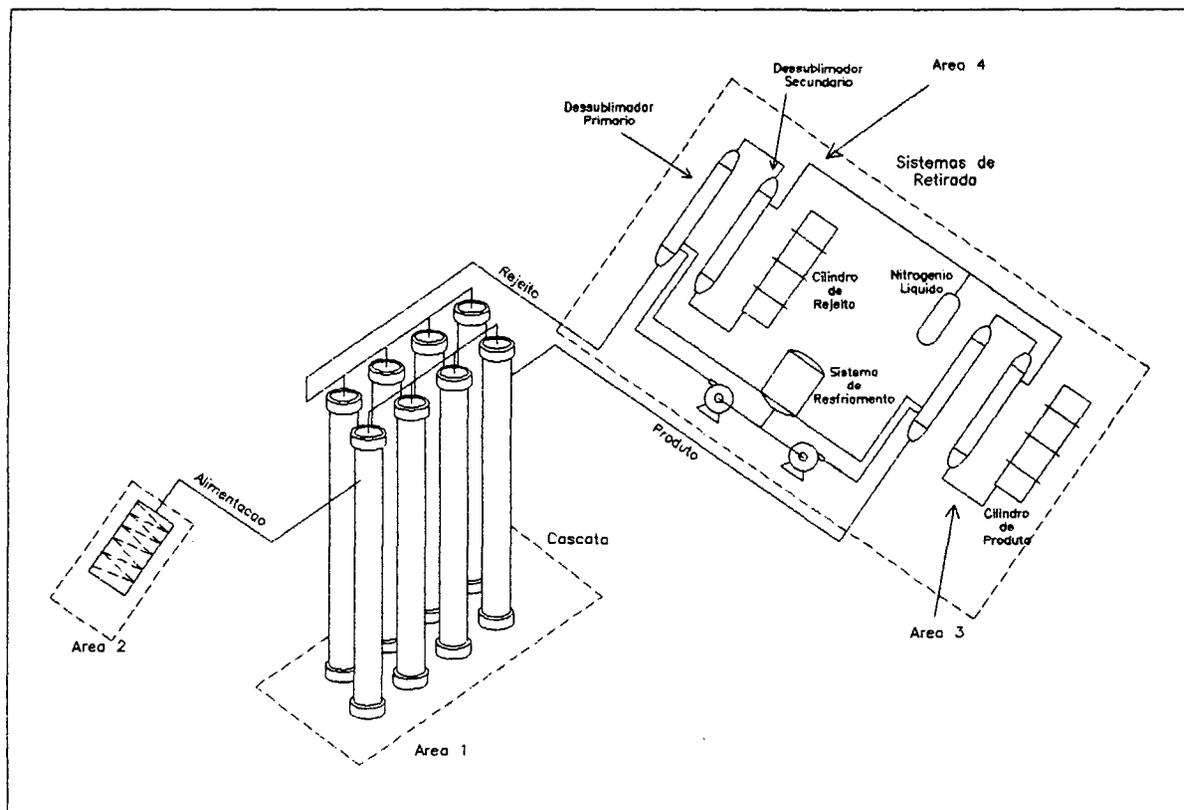


Figura 1 - Diagrama Esquemático da Instalação

3-Falha no sistema de retirada de produto

Supõe-se que, durante uma operação de transferência líquida para um cilindro receptor 30B, ocorra o rompimento de uma tubulação ou conexão flexível que transporta o UF₆. Cerca de 136 kg de UF₆ enriquecido a 3,2% poderá vaziar para a área A3 de retirada de produto.

CASOS ESPECIAIS

A criticidade acidental e incêndio são casos especiais que devem ser tratados por requisitos incorporados ao projeto da planta.

Criticidade Acidental

A possibilidade de ocorrência de criticidade nuclear é excluída da planta, pela adoção de requisitos múltiplos de segurança. Estes requisitos incluem o projeto de sistemas e componentes com geometria e massas seguras, restrições quanto ao enriquecimento máximo de operação, presença de materiais moderadores e controles administrativos.

Incêndio

Experimentos mostram que cilindros 5A[25 kg] e 12B[208 kg] podem romper-se em menos de 10 minutos quando totalmente envolvidos por intenso fogo[5,6]. Para condições mais amenas, em que o fogo é adjacente ao cilindro, o tempo de rompimento varia de algumas dezenas de minutos

para mais de 2 horas. Para cilindros 30B e 48Y imersos em fogo intenso, estima-se que o rompimento deva ocorrer entre 30 e 60 minutos[5,6].

Situações deste tipo são evitadas no projeto da planta pela eliminação de cargas térmicas das áreas onde se manipulam cilindros. A atuação de sistemas de proteção contra incêndio, de grupos de emergência local e de uma brigada de incêndio reduzem a possibilidade de ocorrer um incêndio prolongado dentro da planta. Desta forma, o rompimento de um cilindro 30B ou 48Y devido a incêndio, pode ser considerado um evento não crível, pois ocorreria somente com a falha simultânea de vários dispositivos e medidas de segurança.

MODELOS PARA AVALIAÇÃO DE CONSEQUÊNCIAS

O modelo de transporte das substâncias liberadas para o meio ambiente assume que o UF₆ reage completamente com a umidade do ar e que o HF e UO₂F₂ produzidos, são dispersados na atmosfera segundo uma pluma Gaussiana. O fator de dispersão atmosférica X/Q é calculado conforme Ref. [7]

A dose equivalente efetiva comprometida, via inalação de urânio, é calculada pela equação[8] :

$$D = \sum_{i=1}^n (X/Q) \cdot Q_i \cdot A_i \cdot BR \cdot DCF_i \quad [1]$$

onde:

Q_i = massa do radionuclídeo i liberada [kg];

A_i = atividade específica do radionuclídeo i [Bq/kg];

BR = taxa de respiração [m^3/s];
 DCF_i = fator de conversão de dose equivalente efetiva comprometida devido à inalação do radionucléido i em [Sv/Bq].

A incorporação de urânio, via inalação, é calculada por[8]:

$$I = Q.BR.(X/Q) \quad [2]$$

A concentração de HF no ar é dada por[8]:

$$C = (Q/t).(X/Q) \quad [3]$$

onde: t = tempo de duração da liberação [s]

Nos cálculos efetuados, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- As doses de radiação e as incorporações de U são calculadas para um indivíduo que permanece no centro da pluma ;
- Os particulados têm diâmetro cerca de 1 micron, sendo altamente respiráveis e dispersáveis;
- Liberação ao nível do solo. São analisadas as classes de estabilidade atmosférica, Pasquill F 1 m/s e D 3 m/s.

CARACTERIZAÇÃO DE CONDIÇÕES ACIDENTAIS

As consequências de uma liberação acidental de UF₆ dependem, basicamente, da quantidade liberada, do tempo e das condições de liberação. São medidas em termos de incorporação de urânio e exposição ao HF.

O presente trabalho define como *acidente* toda liberação que provoca, nos limites de propriedade da instalação, incorporação de urânio superior a 10mg e uma exposição ao HF superior aos níveis estabelecidos na Ref. [9], reproduzidos na Tabela 3. Qualquer evento que resultar em valores inferiores a esses limites, é definido como *evento anormal*. A Tabela 3 apresenta níveis de concentração e exposição em função do tempo que, em termos de efeitos, são equivalentes ao IDLH (*immediately dangerous to life or health*) da NIOSH [9].

Na avaliação das consequências radiológicas, a dose calculada pela Equação 1, é comparada com o valor de 250 mSv adotado em [9].

Na Ref.[10] pode ser encontrada uma discussão detalhada sobre a determinação dos níveis de incorporação de urânio e de exposição ao HF, bem com sobre a classificação de eventos.

Tabela 3 - Níveis de concentração e exposição

Tempo de Exposição (min)	Concentração Equivalente ao IDLH (mg/m ³)	Exposição (mg-min/m ³)
1	137	137
2	97	194
5	61	306
10	43	433
15	35	530
30	25	750
60	17,7	1060

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Falha no Sistema de Retirada de Produto

O evento caracteriza-se pela ocorrência de vazamento em um dessublimador contendo 136 kg de UF₆ enriquecido a 3,2%. O UF₆ liberado irá ocupar a área de retirada de produto e rejeito que, em situações acidentais, é isolada do ambiente externo. Pode-se mostrar que cerca de 49% do UF₆ ficará no estado gasoso e o restante se solidificará[4].

A dispersão atmosférica dos produtos do UF₆ é calculada segundo uma pluma Gaussiana. A incorporação de urânio, a exposição ao HF e a dose de radiação são calculadas em função da distância ao ponto de liberação. Assume-se que os limites de propriedade da instalação esteja a uma distância de 100 metros.

Dois cenários principais são analisados para este evento:

C1] Devido a uma falha no isolamento do sistema de ventilação da área atingida, o UF₆ vaporizado escapa totalmente para a atmosfera num período de 15 minutos.

C2] Ocorre a falha no sistema de ventilação, mas apenas uma fração do UF₆ vaporizado é liberada para a atmosfera. Assume-se que 20% do HF e 50% do UO₂F₂ ficam retidos no interior da instalação[11].

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os resultados dos cenários C1 e C2. Observa-se que a incorporação de urânio e a exposição ao HF ultrapassam os valores de referência estabelecidos em [9], podendo atingir níveis que causam danos irreversíveis à saúde a uma distância de 100 m. A partir de 850 m as consequências desses eventos deixam de ser significativas.

As doses de radiação estão bem abaixo do valor de 250 mSv, mesmo nas proximidades da instalação. A 100 m a dose é da ordem de 11 mSv e a 400 m atinge o limite anual de dose equivalente efetiva comprometida para indivíduos do público.

Estes resultados mostram que o edifício que abriga as áreas de retirada de produto e de rejeito e os sistemas de isolamento associados, desempenham uma função importante para a segurança da instalação. Essa função esta relacionada principalmente, ao potencial de risco tóxico-químico do UF₆ e não às suas propriedades radiológicas.

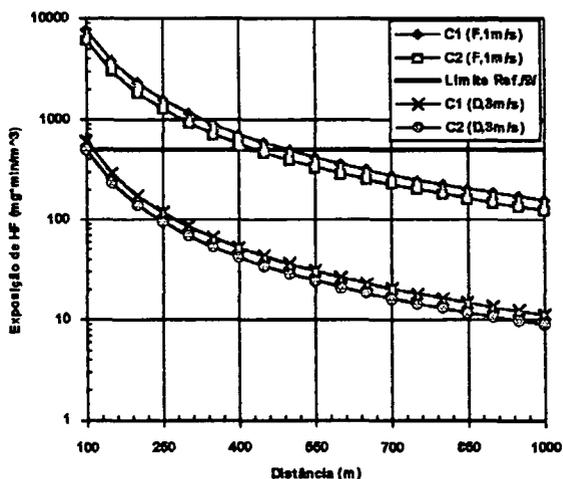


Fig. 2: Casos C1 e C2 - Exposição de HF

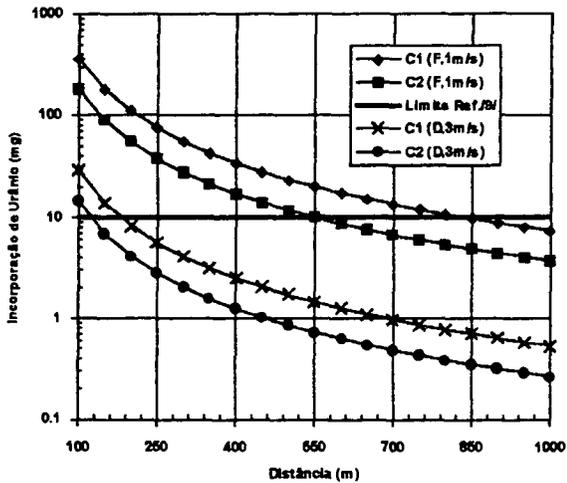


Fig. 3 - Casos C1 e C2: Incorporação de Urânio

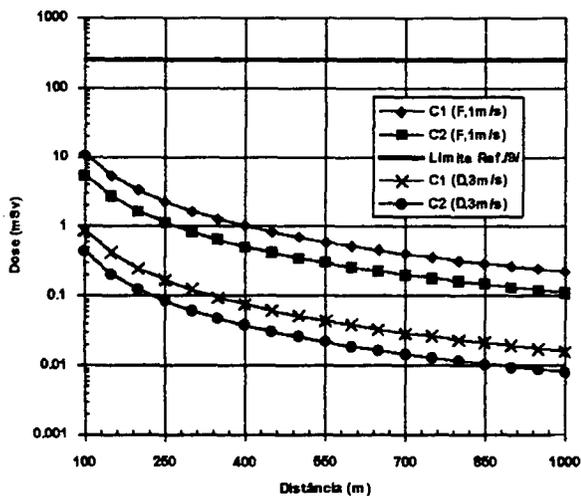


Fig. 4: Casos C1 e C2 - Dose Equivalente Efetiva Comprometida

Os casos C1 e C2 podem ser classificados como *acidentes* que exigiriam medidas emergenciais externas para a sua mitigação.

Falha no Sistema de Alimentação de UF₆ (C3)

O evento é caracterizado pela ruptura da tubulação flexível que liga o cilindro de alimentação à cascata, provocando o vazamento de 1,7 kg de UF₆. Assume-se, conservativamente que todo o UF₆ escapa para a atmosfera.

Neste evento, nenhum dos parâmetros de avaliação [incorporação de urânio, exposição ao HF e dose de radiação], foram ultrapassados mesmo para condições atmosféricas mais desfavoráveis [classe F, 1m/s], para um indivíduo situado a 100m do ponto de liberação.

A exposição ao HF seria de 197 min-mg/m³, o que corresponde a 37% do valor adotado para caracterização de um acidente. A incorporação de urânio seria da ordem de 9,4 mg

para a qual não se detectam efeitos a curto e longo prazos[9]. A dose equivalente efetiva comprometida de 0,15 mSv, não representa perigo à saúde humana, correspondendo a apenas 15% da dose anual para indivíduos do público.

Este evento, portanto, pode ser classificado como um *evento anormal*, e suas consequências contidas nos limites de propriedade da instalação.

Liberação total do UF₆ da Cascata (C4)

O evento é definido como a liberação total do inventário de UF₆ da cascata. Assume-se que 500g de UF₆ são liberados diretamente para a atmosfera.

Este caso também pode ser considerado como um *evento anormal* pois nenhum parâmetro de segurança é ultrapassado. A 100 m do ponto de liberação, a exposição ao HF é da ordem de 11% do valor que caracteriza um acidente. A incorporação de urânio é de 2,7 mg e a dose de radiação é 67 μSv, valores que podem ser considerados desprezíveis e sem condições de causar danos à saúde do homem.

Os resultados dos casos C3 e C4 são conservativos pois não consideram o confinamento propiciado pelo edifício que abriga as áreas de alimentação e da cascata. Além disso o UO₂F₂, sendo um particulado, tende a depositar-se no piso enquanto, e o HF tende a aderir-se às paredes internas da instalação, reduzindo desta forma o termo fonte para o meio ambiente.

No caso C4, a atuação das válvulas de isolamento da cascata limita a liberação de UF₆ a uma fração do inventário total.

Consequentemente, os edifícios que abrigam as áreas de alimentação e da cascata não desempenham funções de segurança.

CONCLUSÕES

Apresentou-se um método simples e objetivo para a identificação dos principais eventos internos que poderiam provocar liberação acidental de UF₆ em uma instalação de enriquecimento isotópico de urânio. O método encontra sua maior aplicação nas primeiras fases de um projeto, quando informações detalhadas sobre os sistemas da instalação ainda não estão disponíveis dificultando a aplicação de métodos mais sofisticados.

Embora preliminares, os resultados obtidos podem ser importantes para a identificação de pontos vulneráveis da instalação, produzindo informações úteis sobre a segurança do projeto. São também de interesse para estudos de impacto ambiental, servindo como instrumento de informação para órgãos de licenciamento ambiental.

Mostrou-se que as áreas de maior perigo potencial são as de retirada de produto e rejeito onde o UF₆ se encontra no estado líquido. O edifício que abriga estas áreas e os dispositivos de isolamento associados exercem uma função de segurança. Vazamentos nestas áreas podem ser classificados como *acidentes*. Já as áreas de alimentação e cascata, onde o UF₆ se encontra subpressurizado, apresentam baixo risco. Vazamentos nestas áreas são caracterizados como *eventos anormais*.

Ficou evidente que em liberações acidentais para a atmosfera, predomina o efeito tóxico-químico do UF₆.

REFERÊNCIAS

- [1] **WORLD BANK Manual of Industrial Hazards Assessment Techniques.** October, 1985.
- [2] **UCC-ND ENGINEERING. Preliminary Safety Analysis Report Centrifuge Plant Demonstration Facility,** Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant, Union Carbide Corporation, Nuclear Division, Oak Ridge, Tennessee, USA, K/TS-11,872, June 1987.
- [3] **OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY Uranium Hexafluoride: A Manual of Good Handling Practices.** Oak Ridge, TN, USA, ORO-651(Rev.6), October, 1991.
- [4] **SIMAN-TOV, M. et alli. Scenarios and Analytical Methods for UF₆ Releases at NRC Licensed Fuel Cycle Facilities.** Oak Ridge, TN, USA, NUREG/CR-3139, June 1984.
- [5] **WILLIAMS, W. R. ; Investigation of UF₆ Behavior in a Fire.** In: Proceedings of the Conference on Uranium Hexafluoride-Safe Handling, Processing and Transporting. (Oak Ridge, Tennessee, USA, May 24-26, 1988). Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, 1988, p.17-24.
- [6] **WILLIAMS, A. P. ; Fire Testing of Bare Uranium Hexafluoride Cylinders.** In: Proceedings of the Conference on Uranium Hexafluoride Handling. (Oak Ridge, Tennessee, USA, October 29-31, 1991). Oak Ridge, PAI Corporation, 1991, p. 159-161.
- [7] **EIMUTIS, E. C., KONICEI, M. G. Derivations of Continuous Functions for the Lateral and Vertical Atmospheric Dispersion Coefficients.** Atmospheric Environment, Pergamon Press, 1972, Vol. 6, pp. 859-863.
- [8] **U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (USNRC). Regulatory Analysis on Emergency Preparedness for Fuel Cycle and Other Radioactive Material Licensees.** NUREG 1140, June 1985.
- [9] **STEPHEN A. MCGUIRE. Chemical Toxicity of Uranium Hexafluoride Compared to Acute Effects of Radiation.** U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG 1391, 1991.
- [10] **NARDOCCI, A.C.; OLIVEIRA NETO, J. M. Critérios para Análise de Segurança de Instalações de Enriquecimento de Urânio** In Proceedings of the V General Conference on Nuclear Energy. (Rio de Janeiro, R.J., Brazil, August 29-Sept. 02, 1994)
- [11] **COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR Usina de Enriquecimento de Gronau. Descrição Simplificada. -2ª Edição-Revisada e Complementada. Tradução de A. C. Camargo.**

ABSTRACT

A method for risk analysis of enrichment facilities is presented and applied to a small scale ultracentrifuge plant. Internal events are identified and the consequences of accidental releases of UF₆ are quantified in terms of its toxicological and radiological impact. It is shown that releases in the feed and the cascade areas offers no hazards to the public. Releases of liquified UF₆ in the withdrawal areas, associated with failures in the building isolation systems, may cause undesirable consequences.