

CRITÉRIOS DE SEGURANÇA DE INSTALAÇÕES DE ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO

Adelaide Cassia Nardocci
IESA Internacional de Engenharia S/A
José Messias de Oliveira Neto
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN

RESUMO

O hexafluoreto de urânio (UF_6) é o principal composto presente nas instalações de enriquecimento de urânio e quando liberado para a atmosfera, reage com a umidade do ar produzindo UO_2F_2 e HF. O HF apresenta apenas a toxicidade química e os compostos de urânio solúveis UF_6 e o UO_2F_2 apresentam a toxicidade radiológica e química. Para exposições agudas à compostos de urânio solúveis, o risco químico é superior ao risco radiológico. Em virtude disto, a aplicabilidade dos critérios de segurança de reatores nucleares para instalações de enriquecimento de urânio, é discutida. Um novo critério baseado na toxicidade química dos compostos de urânio solúveis e HF é apresentado.

INTRODUÇÃO

Em instalações de enriquecimento isotópico de urânio, a principal substância envolvida no processo é o hexafluoreto de urânio (UF_6) que quando liberado para a atmosfera reage com a umidade do ar produzindo o UO_2F_2 (fluoreto de urânio) e HF (fluoreto de hidrogênio). As consequências de eventos com liberação de UF_6 estão associadas à dose equivalente resultante da inalação do urânio (risco radiológico) e também ao efeito tóxico do UO_2F_2 e HF (risco químico ou toxicológico).

Estas propriedades fazem com que a quantidade e as condições do UF_6 presente na instalação seja a principal consideração de segurança para o projeto, construção e operação de instalações de enriquecimento.

Os estudos das propriedades químicas e toxicológicas do UF_6 e seus produtos de hidrólise tem sido melhor conhecidas apenas recentemente, a partir principalmente da experiência obtida em muitos anos de operação e do estudo de eventos ocorridos nestas instalações. Estes estudos [1,2] indicam que no caso de liberação de UF_6 em um acidente, os riscos químicos são superiores aos riscos radiológicos. Os efeitos tóxico-químicos potenciais para um indivíduo exposto ao hexafluoreto de urânio são mais severos que os efeitos radiológicos pois o urânio é fracamente radioativo e por ser altamente solúvel, é rapidamente transportado para os órgãos mais sensíveis.

A equivalência entre o risco químico e radiológico do UF_6 começou a ser discutida recentemente quando *International Atomic Energy Agency* (IAEA) deu início a um trabalho com o objetivo de desenvolver novas normas para o transporte de UF_6 [3].

Em 1988 a *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (USNRC) publicou o 10 CFR Part 76 [4] que se tratava de uma regulamentação específica para plantas de enriquecimento de urânio e nesta ocasião, constatou que seria necessário definir um guia que fosse equivalente ao 10 CFR 100.11 "*Determination of Exclusion Area, Low Population Zone, and*

Population Center Distance." [5] uma vez que, no caso de exposições agudas ao UF_6 , o risco químico da incorporação de urânio solúvel e exposição à HF é limitante. Neste guia é definido que "a área de exclusão deve ser grande o suficiente para que um indivíduo localizado em algum ponto de sua fronteira por duas horas imediatamente após uma liberação postulada de produtos de fissão, não receba uma dose de radiação de corpo inteiro que exceda 0,25 Sv (25 rem) ou uma dose de radiação total que exceda 3 Sv (300 rem) na tireóide de exposição de iodo." [6]

Um grupo de toxicologistas foi então reunido e em 1991 foi publicado o NUREG 1391 [7], o qual estabelece valores de incorporação de urânio solúvel e exposição de HF que foram considerados equivalentes, em efeito, ao guia 10 CFR 100.11. Estes valores tem sido já aplicado ao licenciamento de instalações de enriquecimento americanas [8].

A análise de segurança de instalações de enriquecimento tem sido feita, até então, com base em critérios adotados para centrais nucleares, devido à falta de informações detalhadas de propriedades toxicológicas do UF_6 .

No Brasil, não se dispõe de critérios ou diretrizes específicas que orientem uma análise de segurança em instalações de enriquecimento isotópico de urânio.

O objetivo deste trabalho é sintetizar os estudos recentes, apresentar os critérios citados no NUREG 1391 e discutir a importância da definição de normas específicas para segurança de instalações de enriquecimento que operam com hexafluoreto de urânio.

EFEITOS DA DOSE DE RADIAÇÃO ESTABELECIDAS NO 10 CFR Part 100

As doses de radiação estabelecidas no 10CFR Part 100.11 de 0,25 Sv de corpo inteiro e 3 Sv na tireóide, foram fixadas com base no conhecimento de que estas doses não causam nenhum efeito imediato significativo.

Os efeitos imediatos para doses agudas de radiação são náuseas, perda de apetite, fadiga, vômitos, diarreia e mudanças

que 100 mg, ou seja mais de dez vezes o valor estabelecido pelo NUREG 1391 que é de 10mg. Portanto, as incorporações de urânio solúveis devem ser limitadas com base na toxicidade química e não na toxicidade radiológica.

Desta forma, os critérios utilizados para análise de segurança de centrais nucleares não são aplicáveis às instalações de enriquecimento, uma vez que não garantem os níveis de segurança adequados.

Um outro critério é estabelecido pelo 10 CFR Part 70 [15] de 2 mg para incorporação de urânio solúvel e dose equivalente de 10 mSv (1 rem) como sendo a exposição potencial acima da qual um plano de emergência externo faz-se necessário. A Tabela 3 mostra a dose equivalente efetiva correspondente a incorporação de 2 mg de urânio solúvel para vários níveis de enriquecimento.

Tabela 3 Dose equivalente efetiva (mSv) correspondente a incorporação de 2 mg de urânio solúvel em função do nível de enriquecimento isotópico.

% ²³⁵ U	At. Espec. (Bq/g)	Dose Eq. Ef. (mSv)
0,72	2,6x10 ⁴	0,03
5	1,0x10 ⁵	0,13
10	1,8x10 ⁵	0,24
20	3,7x10 ⁵	0,50
50	9,3x10 ⁵	1,26
95	3,4x10 ⁶	4,60

De acordo com os dados da Tabela 3, mesmo para altos níveis de enriquecimento, o valor de 2 mg de incorporação é mais restritivo que o valor de dose equivalente. Também pode ser observado que a dose equivalente efetiva é superior ao Limite Primário Anual de 1 mSv [16], apenas para níveis de enriquecimento em ²³⁵U da ordem de 50% ou superiores.

TOXICIDADE DO FLUORETO DE HIDROGÊNIO - HF

O HF é um ácido altamente corrosivo e exposições moderadas no ar, podem causar queimaduras na pele, irritações do aparelho respiratório e da membrana conjuntiva. Exposições agudas podem causar a destruição progressiva dos brônquios e inchaço do tecido pulmonar, os quais podem ser fatais.

NIOSH (1985) [12] estabelece uma concentração de HF de 25 mg/m³ como imediatamente perigosa a vida ou saúde (IDLH). O NIOSH IDLH sugere uma concentração de HF que pode ser tolerada por 30 minutos sem prejuízo da capacidade do indivíduo de abandonar o local (*escape-imparing symptoms*) ou algum dano irreversível à saúde, mas não diz qual a concentração que poderia ser tolerada, para tempos diferentes com a mesma ausência de efeitos.

De acordo com o NUREG 1391 [7], para tempos diferentes de 30 minutos, a concentração C equivalente ao valor IDLH de 25 mg/m³ é dada pela seguinte relação:

$$C = 25 \text{ mg/m}^3 (30 \text{ min/t})^{1/2}$$

A Tabela 4 mostra os valores das concentrações para uma exposição de HF equivalente, em efeito, ao nível NIOSH IDLH, de acordo com a expressão acima.

Tabela 4 Valores de concentrações de HF equivalente, em efeito, ao nível NIOSH IDLH.

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

Fonte [7]

CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

Os critérios de segurança de reatores nucleares exigem que os componentes e sistemas sejam projetados, fabricados, montados e testados, baseados em requisitos de qualidade específicos, de acordo com sua função de segurança. Os sistemas podem ser classificados como tendo uma classificação de segurança nuclear ou com padrões não-nucleares, segundo o RG 1.26 [17]. Os sistemas com segurança nuclear são classificados em três classes de segurança definidas a partir das doses de radiação esperadas para os indivíduos do público como por exemplo, encontrado em [18].

Tendo em vista que os riscos químicos são superiores aos riscos radiológicos, o emprego destes critérios para as instalações de enriquecimento de urânio não garantem que os sistemas sejam projetados com a qualidade suficiente e operem com uma margem de segurança equivalente à obtida para os reatores de potência.

Desta forma, a Referência [8] define duas classes de segurança para classificação de sistemas, componentes e estruturas de instalações de enriquecimento de urânio, baseadas na toxicidade química dos compostos de urânio solúveis e HF, de acordo com os critérios recomendados pelo NUREG 1391:

SISTEMAS CLASSE I: Estruturas, sistemas e componentes necessários para prevenir ou mitigar eventos que poderiam resultar em uma exposição, para um indivíduo do público, de 25 mg/m³·(30/t)^{1/2} [onde t= tempo em minutos] de fluoreto de hidrogênio (HF) e/ou uma inalação de 10 mg de urânio solúvel.

SISTEMAS CLASSE II: Estruturas, sistemas e componentes os quais não são SISTEMAS CLASSE I.

na contagem de diferentes tipos de células sanguíneas. Estes efeitos ocorrem somente se um limiar de dose for excedido e nenhum deles é esperado para uma pessoa exposta a 0,25 Sv [7].

Uma dose equivalente efetiva de 0,25 Sv pode causar uma redução temporária da contagem de esperma em indivíduos do sexo masculino e uma elevação das anormalidades cromossômicas do sangue. Os efeitos principais desta dose são os efeitos estocásticos especialmente o aumento do risco de câncer e o perigo potencial para efeitos genéticos nos descendentes das pessoas irradiadas antes da concepção. Entretanto, o 10 CFR Part 100.11 não considera que esses efeitos são significativos em comparação à síndrome aguda da radiação, considerando apenas que este valor de dose tem um potencial para efeitos à longo prazo e não produz efeitos determinísticos significativos.

TOXICIDADE DOS UF₆ E UO₂F₂

Os compostos de urânio UF₆ e UO₂F₂ são considerados solúveis (classe D, segundo o ICRP30 [9]), apresentando um tempo de retenção no pulmão de 1 a 10 dias. Quando inalados, passam rapidamente dos pulmões para a corrente sanguínea, devido à alta solubilidade, causando os maiores danos aos rins pois, além da radiotoxicidade, o urânio exerce nestes órgãos uma toxicidade química. Quando incorporado em grandes quantidades, pode ser letal.

A relação entre a toxicidade química e a toxicidade radiológica dos compostos de urânio depende do tipo de exposição (aguda ou crônica), da classe de solubilidade e do nível de enriquecimento dos compostos. Para exposições agudas à compostos de urânio solúveis, o risco químico é superior ao risco radiológico, para qualquer nível de enriquecimento.

O efeito tóxico mais importante do urânio é o dano aos rins. Altas doses de urânio causam danos aos tecidos renais, ocasionando uma perda da capacidade funcional, podendo também afetar os vasos sanguíneos em todo o corpo. A permeabilidade capilar, pressão sanguínea e edema podem aumentar e a capacidade de coagulação pode diminuir. O urânio pode danificar as membranas capilares e também induzir alguns danos no fígado e tecidos musculares. Seu efeito no sistema nervoso pode ser similar aos efeitos de deposição de outros metais pesados. A Tabela 1 mostra os efeitos à saúde de incorporações de urânio solúvel.

Tabela 1 Efeitos à Saúde de Incorporações de Urânio Solúvel.

Efeito à Saúde	Urânio por kg de peso (mgU/kg)	Urânio (mg) em uma pessoa de 70 kg
50% letalidade	1,63	114
Limiar para danos renais permanentes	0,3	21
Limiar para danos renais ou efeitos transientes	0,058	4,06
Nenhum efeito	0,03	2,1

Fonte: [7]

A dano renal ou limiar de efeito de 0,058 mg-U/Kg [10] é o nível no qual um ou mais dos componentes químicos da urina indicam que houve mudança em alguma estrutura dentro dos rins. Essas mudanças químicas, no nível limiar, tem mostrado serem transientes, com a composição da urina logo retornando ao normal. Exames microscópicos dos rins não detectam danos severos semanas depois da exposição.

No limiar de dano renal transiente, a perda inicial da capacidade de reserva, se alguma, é pequena. Assim, as consequências de longo-prazo (*long-term effects*) para uma pessoa sujeita à uma única incorporação de urânio, no limiar de dano, seria mínima.

Uma incorporação em torno de 8 ou 9 mg produz evidências de efeitos transientes mas nenhum de longo prazo. Se existe alguns efeitos de longo prazo, estes são muito pequenos para serem observados.

A norma NRC (10 CFR 20.103(a)(2) [11]) limita incorporação aguda de urânio solúvel para trabalhadores baseada na toxicidade química em 9,6 mg por semana. Este limite também se aplica à uma única incorporação de curta duração. Este limite foi baseado no TLV-TWA [12].

Baseados nas considerações de que uma incorporação de 9,6 mg de urânio solúvel em uma única incorporação produz, em seres humanos, efeitos mínimos ou não detectáveis ou seja, nenhum efeito de longo prazo ou curto prazo (*short-term effects*), e em estudos de casos acidentais, uma incorporação de urânio solúvel de 9,6 mg, arredondada para 10 mg, foi selecionada pelo documento NUREG 1391 [7], como sendo um valor adequado para ser usado como guia para a determinação de critérios de projeto, classes de segurança e escolha de local.

A Tabela 2, dá a quantidade de urânio solúvel que deve ser inalada para dar uma dose equivalente efetiva de 0,25 Sv (25 rem), para vários níveis de enriquecimento. Os valores de atividade específica foram retirados de Safety Series N° 37 [13] e a dose equivalente efetiva foi calculado usando o fator de conversão de dose de $6,76 \times 10^{-7}$ Sv/Bq para ²³⁴U, de acordo com [14], para compostos classe D e AMAD = 1μ. Os valores do fator de conversão de dose para o ²³⁵U e ²³⁸U são levemente diferentes mas, esta análise não é afetada pelos valores exatos.

Tabela 2 Incorporação de urânio que produz uma dose equivalente efetiva de 0,25 Sv.

% ²³⁵ U	Ativ. Espec. (Bq/g)	Dose Eq. Ef. (Sv/g U)	Incorporação (mg) de U que produz 0,25Sv
0,72	$2,6 \times 10^4$	0,017	14.700
5	$1,0 \times 10^5$	0,068	3.676
10	$1,8 \times 10^5$	0,122	2.049
20	$3,7 \times 10^5$	0,250	1.000
50	$9,3 \times 10^5$	0,629	397
95	$3,4 \times 10^6$	2,298	109

Os dados da Tabela 2 mostram que mesmo para altos níveis de enriquecimento, a quantidade de urânio necessária para produzir uma dose equivalente efetiva de 0,25 Sv é maior

Desta forma, os sistemas, estruturas e componentes que são classificados como SISTEMAS CLASSE I, são considerados como tendo função de segurança e exigem um plano de controle de garantia da qualidade específico.

CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS

A classificação de eventos é importante na orientação e avaliação de requisitos e ou sistemas de segurança, assim como para fornecer subsídios para o planejamento de medidas emergência a fim de evitar ou mitigar as conseqüências para os indivíduos do público de liberações de materiais radioativos.

No caso de reatores nucleares, existem vários parâmetros que devem ser fixados como área de exclusão, critérios para notificação de incidentes de acordo com o 10 CFR Part 20.403 [11], classes de emergência, níveis de intervenção, etc.. Todos esses parâmetros são definidos com base em valores de dose de radiação estimadas para os indivíduos do público, para uma liberação de material radioativo postulada.

Para as instalações do ciclo do combustível em geral, tem também sido empregados os mesmos critérios de dose de radiação, como pode ser visto nas normas CNEN NE-1.09 [19] e CNEN NE-1.11 [20].

Tendo em vista que a toxicidade química dos compostos de urânio e HF é superior, os critérios de dose de radiação não são adequados. Baseado nisto, a Referência [8] propõe que os eventos ocorridos em instalações de enriquecimento sejam classificados em:

EVENTOS ANORMAIS: eventos os quais podem resultar em liberações de UF₆, mas não em quantidades as quais podem resultar em uma exposição, para um indivíduo do público, de 25 mg/m³·(30/t)^{1/2} [onde t= tempo em minutos] de fluoreto de hidrogênio (HF) e/ou uma incorporação de 10 mg de urânio solúvel.

ACIDENTES: eventos os quais podem resultar em liberações de UF₆ em quantidades as quais podem resultar em uma exposição, para um indivíduo do público, de 25 mg/m³·(30/t)^{1/2} [onde t= tempo em minutos] de fluoreto de hidrogênio (HF) e/ou uma incorporação de 10 mg de urânio solúvel.

Segundo os valores recomendados pelo NUREG 1391, a definição de área de exclusão para instalações de enriquecimento pode ser dada por: "área que circunda a usina e pertence obrigatoriamente ao patrimônio do requerente, o qual tem, nessa área, autoridade para determinar todas as atividades julgadas necessárias para fins de segurança, inclusive remoção de pessoal. Deve ter dimensão tal que, um indivíduo situado em qualquer ponto de sua fronteira após uma liberação

postulada de UF₆, não receba uma incorporação de urânio solúvel que exceda 10 mg e/ou uma exposição de HF que exceda 25 mg/m³·(30/t)^{1/2} [onde t= tempo em minutos]".

Mas para determinação da área de exclusão de instalações de enriquecimento é também necessária a definição do acidente básico de projeto. Este aspecto merece atenção especial uma vez que o acidente básico de projeto vai ser função do método de enriquecimento empregado, da quantidade e condições (estado físico, pressão, temperatura, etc.) do UF₆ presente, dos processos envolvidos e do potencial de risco associado.

Os critérios recomendados para definição de classes de emergências e níveis de intervenção para reatores, são baseados em doses de radiação e portanto não se aplicam aos eventos envolvendo a liberação de UF₆. Devem também ser avaliadas as mudanças necessárias nos requisitos de segurança existentes para o transporte de UF₆.

CONCLUSÃO

A comparação entre os riscos químicos e radiológicos do UF₆ e seus produtos de hidrólise mostra que os riscos químicos são superiores, mesmo para altos níveis de enriquecimento.

De acordo com o NUREG 1391, uma incorporação de urânio solúvel de 10 mg e exposição de HF de 25 mg/m³ (30 min/t)^{1/2} são equivalentes, em efeito, à dose equivalente de corpo inteiro de 0,25 Sv recomendada pelo 10 CFR Part 100.11. Mas, a aplicação desses valores para determinação de área de exclusão e zona de baixa população, necessita da determinação de um acidente básico de projeto.

O fato dos riscos químicos serem superiores aos riscos radiológicos no caso de exposições agudas à compostos de urânio solúveis, tem implicações em todas as etapas do projeto, construção e operação das instalações de enriquecimento e não se restringe apenas à equivalência direta entre os valores dos critérios adotados mas, requer uma análise rigorosa de todos os pressupostos que orientam a segurança dessas instalações. Ou seja, é necessário ser levado em consideração que o potencial de risco associado à uma instalação de enriquecimento é consideravelmente inferior ao de um reator de potência.

Isto pode ser melhor entendido se for considerado que em uma instalação de enriquecimento de urânio, o maior potencial de liberação de UF₆ está associado aos sistemas onde ele é encontrado no estado líquido e mesmo no caso de grandes liberações, devido às suas propriedades físicas e químicas, têm um menor potencial para causar conseqüências sérias para os indivíduos do público do que um acidente com liberação de produtos de fissão de um reator nuclear. Ou seja, mesmo no caso de grandes liberações, as conseqüências mais graves ficam restritas ao âmbito da instalação e ou vizinhança imediata.

É importante ressaltar que a avaliação e gerenciamento dos riscos químicos e radiológicos tem se desenvolvido à partir de princípios e considerações marcadamente distintos [21]. Este aspecto é de grande relevância e pode implicar na definição não apenas de valores equivalentes mas pode exigir

uma mudança na filosofia de avaliação de segurança das instalações de enriquecimento e de outras instalações do ciclo do combustível nuclear que operam com compostos de urânio solúveis.

É importante ressaltar que os valores estabelecidos pelo NUREG 1391 não se tratam de limites, uma vez que o conceito de limite aplica-se às exposições controladas, o que não acontece em situações acidentais. Este critério se refere à valores de exposições/incorporações projetados e se destinam apenas a identificar os cenários de acidentes importantes e orientar a implementação de sistemas de segurança e ou medidas de proteção, se necessário, que evitem ou atenuem as consequências para os indivíduos localizados fora da instalações.

REFERÊNCIAS

- [1] SWINT, M AND KATHREN, R.L. Evaluation of Health Effects in Sequoyah Fuels Corporation Workers from Accidental Exposure to Uranium Hexafluorid, NUREG/CR-5566, Washington, 1990.
- [2] SU LU, FU-YAO ZHAO. Nephrotoxic Limit and Annual Limit On Intake for Natural U. *Health Physics*, Vol.58, no.5; pp 619-623;1990.
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA). "Recommendations for Providing Protection During the Transport of Uranium Hexafluoride" IAEA-TECDOC-423. Vienna, 1987.
- [4] U. S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC); **Code of Federal Regulations 10 CFR Part 76**; Regulation of Uranium Enrichment Facilities, 1988.
- [5] U. S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC); **Code of Federal Regulations 10 CFR Part 100**; Reactor Site Criteria.
- [6] Comissão Nacional de Energia Nuclear, **Resolução Nº 9/69** de 1969.
- [7] U. S. Nuclear Regulatory Commission. (USNRC). Chemical Toxicity of Uranium Hexafluoride Compared to Acute Effects of Radiation. NUREG 1391; 1991.
- [8] **Safety Analysis Report of the Louisiana Energy Services (LES) Claiborne Enrichment Center (CEC)**. USA; 1992.
- [9] International Commission on Radiological Protection (ICRP); "Limits for Intakes of Radionuclides by Workers". **Publication Nº 30**; 1978.
- [10] "Airborne Uranium, Its Concentration and Toxicity in Uranium Enrichment Facilities"; **K/PO/SUB-79**; New York; 1979.
- [11] U. S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC); **Code of Federal Regulations 10 CFR Part 20**; "Standards for Protection Against Radiation".
- [12] American Conference of Governmental Industrial Hygienists. "**Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1989-1990**"; Cincinnati, Ohio, 1988.
- [13] International Atomic Energy Agency (IAEA), Advisory Material for the IAEA Regulation for the Safe Transport of Radioactive Material; **Safety Series Nº 37**; Third Edition, IAEA, Viena, Table AIII-1 and AIII-2, p. 124 and 126; 1985.
- [14] DUNNING JR., D.E. et alii, Estimates of Internal dose Equivalent to 22 Target Organs for Radionuclides Occurring in Routine Releases from Nuclear Fuel-Cycle Facilities, Vol. III, **NUREG/CR-0150**, ORNL/NUREG/TM-190/V3, 1981, Appendix B, p.79.
- [15] U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC), **Code of Federal Regulations 10 CFR Patr 70**, Domestic Licensing of Special Nuclear Material.
- [16] Comissão Nacional de Energia Nuclear, Diretrizes Básicas de Radioproteção, **CNEN-NE 3.01**, julho-1988.
- [17] U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC), **Regulatory Guide 1.26**, Quality Group Classifications and Standards for Water-, Steam-, and Radioactive- Waste-Containing Components of Nuclear Power Plants.
- [18] BRYNDA, W.J. et alii, **Design Guide for Category II Reactors Light and Heavy Water Cooled Reactors**, BNL 50831-II, 1978.
- [19] Comissão Nacional de Energia Nuclear, Modelo Padrão Para Análise de Segurança de Fábricas de Elementos Combustíveis, **CNEN-NE-1.09**, set-1980.
- [20] Comissão Nacional de Energia Nuclear, Modelo Padrão Para Análise de Segurança de Usinas de Produção de Hexafluoreto de Urânio Natural, **CNEN-NE-1.11**, jan.-1983.
- [21] BROWN, S.L., Harmonizing Chemical and Radation Risk Management, *Environ. Sci. Techonol.*, Vol 26, Nº 12, 1992.