

5.4 CÁLCULO DAS FREQUÊNCIAS

Os eventos selecionados pela Matriz de Riscos tiveram as frequências determinadas conforme a análise de acidentes – Capítulo 9 do RAS da FEC-II, com base em Banco de Dados Internacionais e Publicações especializadas, tais como:

- ◆ “Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijmond Area, a Pilot Study” A Report to the Rijmond Public Authority, D. Reidel Publishing Company, 1982
- ◆ Atallah, S, “Assessing and Managing Industrial Risks, Chemical Engineering, Sept., 1980
- ◆ U.S. Nuclear Regulatory Commission “An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants “- WASH-1284, October, 1975 (NUREG/CR – 57/014)
- ◆ The Institute of Electrical and Electronics Engineers, INC “IEEE - “Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations“, Dec., 1983 (IEEE Std 500-1984)

No cálculo das frequências de ocorrência de acidentes foram utilizadas duas abordagens, conforme descritos a seguir:

Uma abordagem baseou-se em bancos de dados de falhas das referências listadas acima. Neste caso, a estimativa das frequências foi feita através de um modelo simplificado, onde foram consideradas as falhas dos principais componentes do sistema em análise que, predominantemente, contribuem para a ocorrência dos acidentes.

A frequência de ocorrência de vazamentos externos f , para cada um dos seguintes produtos estocados: GLP, amônia, hidrogênio e metanol, foi estimada utilizando a seguinte equação:

$$f = \lambda_v \cdot N_v + \lambda_{tub} \cdot L_{tub} + \lambda_{tq} \cdot N_{tq} + P_{tr} \cdot N_{tr}$$

onde:

- λ_v = frequência de rupturas e vazamentos de válvulas (ano⁻¹);
- N_v = número de válvulas envolvidas do sistema;
- λ_{tub} = frequência de rupturas e vazamentos em tubulações (m⁻¹.ano⁻¹);
- L_{tub} = comprimento de tubulação envolvido do sistema (m);
- λ_{tq} = frequência de rupturas e vazamentos em tanques (ano⁻¹);
- N_{tq} = número de tanques envolvidos do sistema;
- P_{tr} = probabilidade de vazamento por operação de transferência; e
- N_{tr} = número de transferências para o sistema (ano⁻¹).

Uma segunda abordagem (adotada para eventos envolvendo a liberação de urânio), baseou-se na experiência histórica mundial na fabricação de elementos combustíveis para reatores a água leve (USAEC, WASH-1284, 1974; SOUZA, 1994) e nos registros de ocorrência de eventos nestas instalações referenciados na Análise Histórica.

Foram calculados os limites superior e inferior da frequência de ocorrência, com intervalo de confiança de 95%, como mostrado a seguir.

Da experiência de operação de reatores a água leve, tem-se que para 1000 MW_e produzidos, necessita-se de 40 toneladas de UO₂ enriquecido por ano. Segundo WASH-1284, existe uma potência total instalada de 282.000 MW_e em reatores a água leve no mundo. Portanto, existe a necessidade de produção de 11.280 toneladas de UO₂ por ano para abastecer estas instalações. A FEC-II terá uma capacidade máxima de produção de 150 toneladas de UO₂ por ano. Assumindo-se FEC equivalente como uma fábrica de elementos combustíveis semelhante à FEC-II, existiriam instaladas no mundo, aproximadamente, 75 FECs equivalentes.

Considerando um aumento linear de fábricas equivalentes desde 1947 (nenhuma FEC equivalente) até 1997 (75 FECs equivalentes), chega-se a uma operação acumulada de 1.880 FEC equivalentes ano e um número médio de 38 FECs equivalentes ao longo dos últimos 50 anos.

Para cálculo dos limites das frequências de ocorrência dos acidentes, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- a) O tempo para a ocorrência de acidentes segue uma distribuição exponencial; e
- b) As fábricas de elementos combustíveis para reatores a água leve são semelhantes à FEC-II.

Sendo θ uma estimativa para o valor do tempo médio para a ocorrência de acidentes, tem-se que:

$$\theta = \{(N - r) \cdot t_r + \sum_{i=1}^r t_i\} / r$$

onde:

N = número médio de FECs equivalentes nos últimos 50 anos;

r = número de ocorrências de acidentes de uma determinado tipo; caso não haja registro de acidentes, assumir, conservativamente, r = 1;

t_r = tempo até o r^{ésimo} acidente; e

t_i = tempo até o i^{ésimo} acidente.

A faixa de incerteza na estimativa da frequência de ocorrência de acidentes pode ser obtida através dos limites bilaterais inferior (λ_1) e superior (λ_2), com um intervalo de confiança de (1-2 α), dadas por:

$$\lambda_1 = \frac{X_{1-\alpha}^2(2r)}{2 \cdot r \cdot \theta}$$

$$\lambda_2 = \frac{X_{1-\alpha}(2r)}{2 \cdot r \cdot \theta}$$

onde:

$(1-2\alpha)$ = intervalo de confiança de 95%; e

$X_{\phi}^2(2r)$ = valor da distribuição de X^2 para percentil ϕ com $(2r)$ graus de liberdade.

A obtenção do valor de r foi efetuada através da análise histórica dos acidentes. Para os tipos de acidentes sem registro de ocorrência em instalações de fabricação de elementos combustíveis, foi assumida, conservadoramente, uma ocorrência para cada tipo no final do período de observação (1997).

Na Tabela 5.14 a seguir, são listados os resultados dos cálculos de frequência dos eventos selecionados com base na Matriz de Riscos da etapa de Identificação dos Perigos.

Tabela 5.14 FREQUÊNCIAS DOS EVENTOS SELECIONADOS

Identificação do Evento	Descrição	Frequência / ano
1	Ruptura hidrostática de cilindro com sobreenchimento de UF ₆ durante o aquecimento na autoclave – acidente postulado WASH 1284 -	< 1,0 E-07
2	Ruptura de cilindro de UF ₆ devido ao superaquecimento com vazamento de UF ₆ no interior da autoclave – acidente postulado WASH 1284 -	< 1,0 E-07
3	Rompimento de tubulação da linha de alimentação de UF ₆	8,3 E-04
4	Incêndio de metanol nos filtros rotativos	5,3 E-04
5	Explosão de hidrogênio no forno de sinterização de pastilhas – acidente postulado	5,3 E-04
6	Explosão de hidrogênio no forno de leito fluidizado	5,3 E-04
7	Explosão de hidrogênio em lavador de gases	5,3 E-04
8	Explosão de nitrato de amônio em lavador-aspersor de gases	1,6 E-05
9	Explosão / incêndio de pó de UO ₂ no vaso de passivação	5,3 E-04
10	Explosão em nuvem de GLP no prédio	< 1,0 E-07



Tabela 5.14 FREQUÊNCIAS DOS EVENTOS SELECIONADOS

Continuação

Identificação do Evento	Descrição	Frequência / ano
11	Explosão em nuvem não confinada de amônia externamente	< 1,0 E-06
12	Explosão em nuvem não confinada de GLP externamente	5,0 E-07
13	Vazamento tóxico externo de amônia	1,10 E-05
14	Vazamento tóxico externo de GLP	5,5 E-06
15	Incêndio externo de amônia	5,5 E-06
16	Incêndio externo de GLP	2,5 E-06
17	Incêndio externo de hidrogênio	6,0 E-06
18	Incêndio externo de metanol	1,5 E-05
19	Acidentes de Criticalidade –acidente postulado – WASH 1284	< 1,0 E-07

5.5 ANÁLISE DE CONSEQUÊNCIAS, VULNERABILIDADE E RISCOS

5.5.1 Análise de Consequências

5.5.1.1 Introdução

As consequências que podem resultar dos eventos selecionados foram avaliadas quanto a:

- Toxicidade química e radiológica;
- Explosividade e;
- Inflamabilidade

Para os eventos envolvendo a liberação de UF₆ para a atmosfera, assim como a liberação dos compostos resultantes da reação do UF₆ com a umidade do ar (HF e UO₂F₂), foram utilizados modelos simplificados, que utilizam métodos de análise conservadores, sendo os resultados apresentados advindos de uma sucessão de aproximações também conservadoras. Estes modelos são apresentados adiante. As consequências foram analisadas em termos de toxicidade química e radiológica para funcionários e indivíduos do público.

Para a estimativa das consequências de eventos envolvendo a liberação de outras substâncias químicas, assim como envolvendo a possibilidade de ocorrência de incêndio e explosão, foi utilizado como ferramenta de cálculo o código WHAZAN (WHAZAN, 1988). Uma descrição resumida dos principais modelos de cálculos do código WHAZAN é apresentada também adiante.

5.5.1.2 Modelos Utilizados para o Cálculo das Consequências de Eventos Envolvendo a Liberação de UF₆

O UF₆, quando liberado para a atmosfera, reage rapidamente com a água presente no ar para formar os compostos de UO₂F₂ (fluoreto de urânio) e o HF (ácido fluorídrico), os quais são altamente tóxicos. O UO₂F₂ e o UF₆ são compostos de urânio solúveis e apresentam tanta toxicidade química quanto radiológica, enquanto o HF apresenta apenas a toxicidade química. Desse modo, as consequências avaliadas foram concentração de HF no ar; incorporação, via inalação do U liberado e a dose equivalente efetiva.

♦ *Difusão Atmosférica*

Os valores dos termos de difusão atmosférica foram calculados levando-se em consideração que as liberações ocorrem no nível do solo, utilizando o formalismo apresentado nas referências (NUREG, "Assumptions Used for Evaluating The Potential Radiological Consequences of a Loss of Coolant Accident for Pressurized Water Reactors"; EIMUTIS, 1972 e MILLER C.W., 1987).

Considerou-se, ainda, o período de tempo de 0-8 horas e a utilização da seguinte equação:

$$\frac{X}{Q} = \frac{1}{\pi \cdot \mu \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \exp\left(-\frac{h_e^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right)$$

onde:

X/Q = termo de difusão atmosférica (s/m³);

μ = velocidade média do vento (m/s);

σ_y = desvio lateral da pluma (m);

σ_z = desvio vertical da pluma (m); e

h_e = altura efetiva da liberação (m).

O parâmetro h_e é definido conforme a seguinte equação:

$$h_e = h + \Delta h$$

onde:

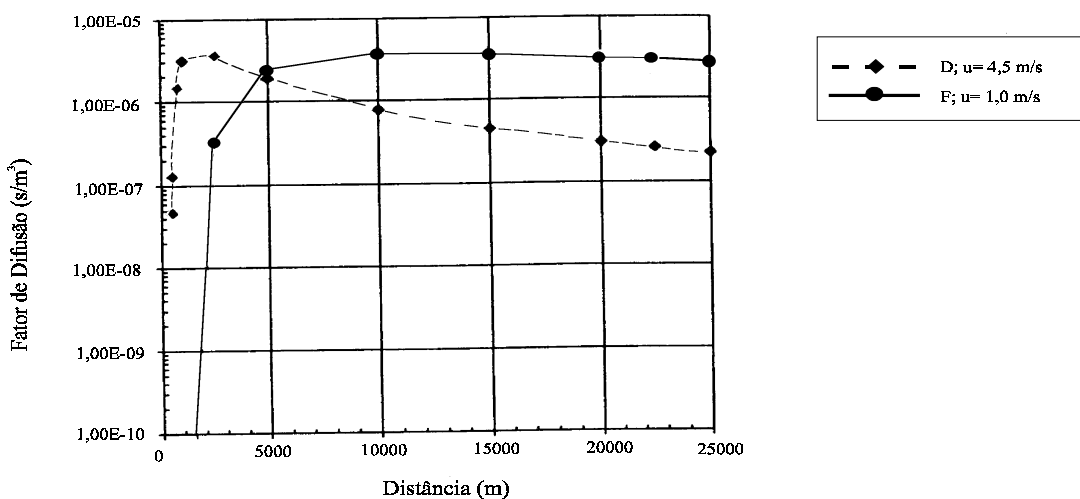
h = altura física do ponto de liberação (normalmente é a altura da chaminé) (m); e

Δh = elevação da pluma ("plume-rise")(m).

A estimativa de Δh é descrita adiante.

Os valores de σ_y e σ_z e os termos de difusão atmosférica são retirados da Figura 5.2 abaixo. referência (EIMUTIS E.C., 1972)

Figura 5.2 DIFUSÃO ATMOSFÉRICA



Cálculo de Δh

O “Plume-Rise” foi calculado para duas situações distintas, a saber:

- 1) Classe de estabilidade atmosférica: F;
velocidade do vento (u): 1 m/s; e
- 2) Classe de estabilidade atmosférica: D;
velocidade do vento (u): 4,5 m/s.

As equações utilizadas para as duas situações são apresentadas a seguir.

“Plume-Rise” para Classes de Estabilidade F

Considerando a categoria de estabilidade F, o “Plume-Rise” foi calculado pela seguinte equação (USAEC, 1968):

$$\Delta h = 5,1 F^{1,4} \cdot s^{-3/8}$$

onde:

F = fluxo de flutuação (“buoyancy flux”) (m^4/s^3); e
s = parâmetro de estabilidade (s^{-2}).

O fluxo de flutuação e o parâmetro de estabilidade foram calculados utilizando a metodologia apresentada em (USAEC, 1968).

“Plume-Rise” para Classe de Estabilidade D

Considerando categoria de estabilidade D, o Δh foi calculado pela seguinte equação (USAEC, 1968):

$$\Delta h = 1E+3 \cdot \bar{F} \cdot u^{-3}$$

Para as duas situações analisadas foram usados os resultados mais conservativos, ou seja:

- Classe de estabilidade atmosférica \bar{F} (u = 1 m/s):
 $\Delta h \sim 88,2$ m

- Classe de estabilidade atmosférica \bar{D} (u = 4,5 m/s):
 $\Delta h \sim 66,8$ m

◆ **Concentração de HF**

Concentração no ar do HF liberado para a atmosfera é calculada pela equação:

$$C_{HF} = \left(\frac{X}{Q} \right) \cdot \left(\frac{m_{HF}}{t} \right)$$

onde:

C_{HF} = concentração de HF no ar (mg/m³);
 m_{HF} = massa de HF liberada para a atmosfera (mg); e
 t = tempo de duração da liberação (s).

◆ **Incorporação de U, via Inalação**

A incorporação, via inalação, das substâncias liberadas para a atmosfera é dada pela equação (NUREG 1140):

$$I_u = \left(\frac{X}{Q} \right) \cdot m_u \cdot BR$$

onde:

I_u = massa de U incorporada, via inalação (mg);
 m_u = massa de U liberada para a atmosfera (mg); e
 BR = taxa de respiração média de um indivíduo adulto (m³/s).

◆ **Dose Equivalente Efetiva**

No cálculo da dose equivalente foram considerados dois caminhos de exposição: exposição interna devido à inalação de radionuclídeos e exposição externa devido à imersão na pluma radioativa.

Dose Equivalente Efetiva Comprometida por Inalação

A dose equivalente efetiva comprometida por inalação dos radionuclídeos liberados para a atmosfera é calculada pela equação apresentada adiante, tendo como referência o Regulatory Guide 1.109, Revision 1, October, 1977 da NUREG.

$$D_{in} = \sum_i I_i \cdot \bar{A}_i \cdot (DCF)_{in}$$

onde:

D_{in} = dose equivalente efetiva comprometida por inalação (Sv);
 I_i = massa do radionuclídeo i incorporada via inalação (mg);
 A_i = atividade específica do radionuclídeo i liberado (Bq/mg); e
 $(DCF)_{in}$ = fator de conversão de dose equivalente efetiva comprometida por inalação (Sv/Bq).

Os valores dos fatores de conversão de dose equivalente efetiva comprometida por inalação, $(DCF)_{in}$, foram retirados de NUREG/CR 3332.

Dose Equivalente Efetiva devido à Imersão

A dose equivalente efetiva devido à imersão na pluma radioativa é calculada pela equação:

$$D_a = \left(\frac{X}{Q} \right) \cdot \sum_i m_i \cdot A_i \cdot (DCF)_a$$

onde:

D_a = dose equivalente efetiva comprometida devido à imersão (Sv).

m_i = massa do radionuclídeo i liberada para a atmosfera (mg); e

$(DCF)_a$ = fator conversão de dose equivalente efetiva devido à imersão na pluma radioativa (Sv.s⁻¹.Bq⁻¹.m³).

Para o cálculo das atividades liberadas pelos eventos postulados para a instalação foram utilizados os valores de atividade específica de urânio estabelecidos no Safety Series 37.

Normalmente, as doses são calculadas considerando-se a contribuição dos radionuclídeos U²³⁴ e U²³⁸. Contudo, a utilização da metodologia do Safety Series 37 permite que seja determinada apenas a atividade total da massa de urânio liberada, não sendo possível determinar a atividade de cada isótopo.

Desse modo, as doses resultantes das liberações de urânio foram calculadas de maneira conservativa, utilizando-se os fatores de conversão de dose que apresentam os maiores valores por caminho de exposição considerado. Exemplificando: para as doses devido à inalação o maior fator de conversão de dose corresponde ao U²³⁴, desse modo considerou-se que a atividade de urânio liberada corresponde apenas a este isótopo. Procedimento análogo foi utilizado para a dose devido à imersão na pluma radioativa, onde o maior fator de conversão de dose corresponde ao U²³⁵.

◆ Considerações Gerais

Nos cálculos efetuados foram adotadas as seguintes hipóteses:

-As doses foram calculadas para um indivíduo que permaneceu no centro da pluma durante o período de liberação;

-Os particulados tem diâmetro de 1 μ m;

-O urânio liberado se origina dos compostos UF₆ e UO₂F₂. Estes compostos são definidos como sendo da classe de inalação D, a qual foi adotada na presente análise; e

-A taxa de respiração para um adulto é de 2,54 E-04 m³/s .

5.5.1.3 Modelos Utilizados para o Cálculo das Conseqüências de Eventos Envolvendo a Liberação de Outras Substâncias Químicas

Para a avaliação das possíveis conseqüências de liberações acidentais de gases ou líquidos tóxicos e/ou inflamáveis foi utilizado o código computacional WHAZAN o qual foi desenvolvido pela “Technica Internacional Ltd”, em colaboração com o Banco mundial.

O programa compreende vários modelos de conseqüências, além de uma base de dados contendo valores de propriedades relevantes de importantes substâncias químicas selecionadas. Os modelos do programa abrangem as seguintes áreas:

- ◆ Liberação de substâncias químicas;
- ◆ Comportamento imediatamente após a liberação;
- ◆ Dispersão na atmosfera;
- ◆ Incêndios e explosões; e
- ◆ Vulnerabilidade.

O risco que uma instalação química pode apresentar para indivíduos do público está predominantemente relacionado à possibilidade de descargas acidentais de líquidos ou vapores tóxicos e/ou inflamáveis.

No WHAZAN, as liberações acidentais de substâncias perigosas são analisadas da seguinte maneira:

- 1) É feita a determinação de um conjunto representativo de liberações (“release cases”), definido em termos do material que pode ser liberado, da quantidade de material estocado e das condições de estocagem (na referência Whazan é apresentado um guia para a definição de casos representativos de liberação); e
- 2) É calculada a quantidade de material liberado até que o mesmo sofra ignição (no caso de materiais inflamáveis) ou até que o mesmo seja disperso na atmosfera a uma concentração escolhida.

No guia do usuário do programa WHAZAN é apresentada uma descrição detalhada dos modelos utilizados par o cálculo das conseqüências de liberações acidentais, sendo que no presente item é feita apenas uma descrição simplificada dos principais modelos utilizados.

Modelo de Liberação Líquida

O modelo para liberação líquida do WHAZAN calcula a taxa de liberação, em kg/s, de uma substância química estocada que encontra-se no estado líquido em condições ambiente ou que é liquefeita por refrigeração. O modelo também pode calcular a taxa de liberação de uma gás que está liquefeito por pressão.

Modelo de Liberação Gasosa

O modelo para liberação gasosa do WHAZAN calcula a taxa de liberação do gás em kg/s. Este modelo assume uma expansão adiabática reversível e que o gás comporta-se como um gás ideal.

Modelo de Liberação Bifásica

O modelo de liberação bifásica do WHAZAN calcula a taxa de liberação de um líquido que pode se vaporizar parcialmente (“flashing liquid”), em kg/s, assim como estima a fração desse líquido que se vaporizou. O vazamento é tratado como se fosse aerossol, contendo tanto a parte líquida como a parte vaporizada.

Modelo de “Espalhamento” Líquido (“Liquid Spread”) e Evaporação

Este modelo assume que o líquido, em qualquer instante, forma uma poça (“pool”) de forma plana e circular e de altura uniforme. A poça será espalhada sob a ação da gravidade até que atinja qualquer parede de contenção.

Parte da massa da poça pode ser perdida por evaporação. Se a temperatura ambiente é inferior à temperatura correspondente ao ponto de ebulição da substância, o modelo calcula a taxa de evaporação da mesma.

Modelo de Dispersão a jato (“Jet Dispersion”)

Este modelo assume que o “envelope” no interior do qual a concentração de um jato turbulento está acima de um nível especificado é representado por um eixo maior com comprimento A (um) e um eixo menor com comprimento B (m), ou seja, o modelo calcula o comprimento (A) e a largura (B) do jato turbulento, definindo assim a forma do mesmo.

Modelo de Expansão Adiabática

Para a estimativa da rápida expansão adiabática experimentada durante a liberação instantânea de um vapor pressurizado ou de um “flashing liquid” é utilizado um modelo hemisférico simples de duas zonas. Este modelo assume que o “núcleo” de uma concentração uniforme contendo 50% da massa liberada está circundado por uma zona periférica caracterizada por uma distribuição Gaussiana de concentração.

Com este modelo, é possível estimar-se, para gases ou líquidos, a energia da expansão (em J), assim como a concentração do “núcleo” em função do tempo (em kg/m³) e o raio do “núcleo” (em m).

Modelo de “Plume-Rise”

O modelo do WHAZAN calcula a elevação da pluma (em metros).

Modelo de Dispersão de Gás Pesado

Este modelo calcula a concentração de gases definidos como pesados, no nível do solo e no eixo central da pluma, para liberação instantânea e contínua.

As principais hipóteses assumidas neste modelo são que a superfície do solo é plana e que qualquer rugosidade do solo é uniforme, ou seja, não existem obstruções significativas. Também é assumido que as condições climáticas são constantes até o instante em que, na pluma, a concentração atinja o menor valor de interesse.

Modelo de Dispersão de Gás Leve

O modelo de dispersão de gás leve do WHAZAN utiliza o modelo Gaussiano padrão para calcular a concentração do nível do solo. Este modelo está apto a calcular as concentrações apenas para distâncias entre 100 a 100.000 metros na direção do vento.

Modelo de Incêndio em Poças

No WHAZAN, é feita a modelagem do espalhamento e da queima de uma poça de líquido inflamável, de maneira similar ao fenômeno conjunto do espalhamento e da evaporação. Este modelo permite calcular a quantidade de calor liberada em Joule.

Modelo de Jatos de Fogo

Este modelo calcula o comprimento da chama (em metros), assim como os níveis de radiação térmica.

Modelo de Bolas de Fogo "BLEVE's"

Este modelo calcula a dimensão, a duração e a intensidade irradiante de bolas de fogo de líquidos e/ou vapores inflamáveis. A energia liberada pela combustão é calculada em Joule, sendo também estimado o fluxo de calor a uma distância do centro da bola de fogo.

Modelo de Explosão de Nuvem de Vapor

O WHAZAN utiliza dois modelos para calcular os efeitos de explosões de nuvem de vapor. O primeiro modelo expressa a sobrepressão resultante da explosão como uma função contínua da distância do centro da pluma. O segundo faz a correlação entre níveis definidos de danos à prédios e a distância de uma explosão com energia conhecida.

Inflamabilidade de Jatos, Nuvens e Plumas

De maneira resumida, pode-se afirmar que existem incertezas nas taxas estimadas de liberação acidental de vapores perigosos. Também podem haver diferenças significativas entre as concentrações pontuais e as concentrações ponderadas no tempo em jatos, nuvens e plumas. Estas são produzidas pelo WHAZAN.

No cálculo das distâncias de segurança, estas dificuldades indicam que devem ser consideradas concentrações levemente abaixo do limite inferior de inflamabilidade ("lower flammability limit"-PFL). Normalmente são utilizadas concentrações correspondentes a LFL/2 ou LFL/4, conforme

definido no WHAZAN. Na verdade, os limites de inflamabilidade cotados representam os valores extremos observados, que acrescentam uma maior margem de segurança.

Radiação Térmica Proveniente de Incêndios

No WHAZAN, são definidos os níveis de fluxo de calor que podem ser considerados críticos, em termos de danos para seres humanos e materiais.

O nível de dano causado é função da duração da exposição, tanto quanto do fluxo de calor, que vale tanto para os efeitos em prédios e equipamentos de uma instalação quanto para os efeitos em pessoas.

A variação dos efeitos danosos em seres humanos em função do fluxo de calor e da duração da exposição é expressa na forma de uma equação de Probit, conforme apresentada a adiante

Convém mencionar que dentre os três tipos de incêndio modelados pelo WHAZAN, dois deles (incêndio em poças e jatos de fogo) normalmente possuem uma duração significativa. Contudo, bolas de fogo/BLEVEs possuem duração limitada, da ordem de 2 a 50 segundos, para as massa dimensionadas pelo WHAZAN. Desse modo, fica evidenciado que somente os maiores níveis de fluxo de calor são significativos para este tipo de evento, além do que os danos mais significativos ocorrerão somente em pessoas e não em estruturas ou equipamentos de processo.

Efeitos Tóxicos de Nuvens e Plumaz

O WHAZAN possui cinco parâmetros usados para determinar quão significativas são as concentrações de substâncias químicas tóxicas. São eles :

- O valor de “Perigo imediato para a Vida e Saúde” (IDLH);
- O LC₅₀, que corresponde ao valor de concentração que pode levar a 50% de fatalidades na grande população. Os valores de WHAZAN aplicam-se para exposições de 30 minutos e;
- Três parâmetros de toxicidade, denominados A, B e N.

Os valores de IDHL normalmente são apropriados para a mínima concentração de interesse, exceto nos casos onde a liberação pode persistir por período longos e a evacuação é difícil. Nestes casos é possível a ocorrência de altos níveis de fatalidade à concentrações inferiores ao IDHL. Os valores de LC₅₀ são considerados muito alto para serem adotados como concentrações limitantes, porém podem ser úteis em circunstâncias especiais.

Conforme mencionado anteriormente, os valores do WHAZAN aplicam-se para exposições de 30 minutos. Porém, valores para outras durações podem ser calculados utilizando-se o parâmetro de toxicidade N, conforme a seguinte equação:

$$LC_{50}(T) = LC_{50}(30) \times (30/t)^{LN}$$

onde T é a duração da exposição em minutos.

Os valores de A, B e N podem ser combinados com valores tabelados de Probit na determinação da concentração que pode ser esperada para produzir um nível de fatalidade estabelecido para uma

duração de exposição estabelecida.

5.5.1.4 Modelos Utilizados para o Cálculo das Conseqüências de Eventos Envolvendo a Liberação de UO₂

◆ Difusão Atmosférica

Nas análises realizadas para eventos envolvendo a liberação de UO₂ para a atmosfera assumiu-se, conservativamente, que todo material seria lançado instantaneamente para a atmosfera (ou seja, não foi dado crédito a nenhuma barreira de contenção do prédio e nem ao Sistema de Exaustão), assim como considerou-se a classe F de estabilidade atmosférica e velocidade média do vento de 1 m/s.

O valor do termo de difusão atmosférica foi calculado utilizando-se a seguinte equação (USAEC, 1968):

$$\left(\frac{X}{Q}\right)(x, y, z) = 2 - 1 / 2 \cdot \pi - 3 / 2 \cdot (\sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z) - 1 \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{(x - \bar{u} \cdot t)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\}$$

onde:

$$\left(\frac{X}{Q}\right)p(x, y, z) = \text{termo de difusão atmosférica para liberação instantânea (m}^3\text{);}$$

x, y, z = coordenadas dos eixos, com origem no ponto (0,0,0) (m);

σ_x = desvio padrão da distribuição de material na pluma na direção x (m); e

t = tempo de liberação (s).

A concentração no centro do “puff”, assumindo-se $x = u \cdot t$, $y = z = 0$ e $\sigma_x = \sigma_y$ pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\left(\frac{X}{Q}\right)_p(x, y, z) = 2^{-1/2} \cdot \pi^{-3/2} (\sigma_y^2 \cdot \sigma_z)^{-1} \quad (9.0-13)$$

O termo de difusão atmosférica foi calculado para a distância mínima entre a instalação e os limites de propriedade da INB, que é de 450 metros. o valor estimado para a referida distância foi de 2,6 E-05 m³.

◆ Dose Equivalente Efetiva Comprometida por Inalação

Para os eventos envolvendo a liberação de UO₂ para o meio ambiente, foram calculadas as doses equivalentes comprometidas por inalação de U.

A dose equivalente efetiva comprometida por inalação foi calculada pela equação (Regulatory Guide 1109).

$$D_{in} = \sum_i \left(\frac{X}{Q} \right)_p \cdot m_i \cdot A_i \cdot BR \cdot (DCF)_{in} \cdot t$$

onde:

m_i = massa do radionuclídeo i para a atmosfera (mg); e

t = tempo da passagem da pluma sobre o ponto x (= 450 m) (s).

Os valores dos fatores de conversão de dose equivalente efetiva comprometida por inalação, $(DCF)_{in}$, foram retirados do NUREG/CR -3332.

◆ Observações à respeito do Cálculo de Doses

No presente relatório, as doses equivalentes efetivas foram calculadas considerando-se apenas a liberação dos isótopos U²³⁴, U²³⁵ e U²³⁸.

Para o cálculo das atividades liberadas pelos eventos postulados para a instalação, foram utilizados os valores de atividade específica de urânio estabelecidos no Safety Series 37.

Nos cálculos efetuados, foram adotados as seguintes hipóteses:

As doses foram calculadas para um indivíduo permanecendo no centro da pluma durante o período de passagem da pluma sobre o ponto considerado (450 m);

Considerou-se que o tempo de passagem da pluma é de 96 s, equivalente a $6\sigma_y$; e

O urânio liberado se origina do UO₂. Este composto é definido como sendo da classe de inalação Y, a qual foi adotada na presente análise.

5.5.1.5 Resultados

A seguir são apresentados os resultados da análise de consequências dos eventos acidentais identificados pela Matriz de Riscos com base na APP realizada e nos acidentes postulados no RAS.

◆ *Evento 1 - Ruptura hidrostática de cilindro com sobreenchimento de UF₆ durante o aquecimento na autoclave*

O acidente envolve o rompimento do cilindro e da autoclave do sistema de vaporização, localizados na Sala UFD.01-104a, com liberação de UF₆. Considerou-se que o cilindro da autoclave contém uma massa excessiva de UF₆, o que, durante o processo de aquecimento do mesmo, pode levar ao rompimento tanto do cilindro quanto da autoclave.

Na autoclave, o cilindro com excesso de UF₆ é aquecido a 100 °C, havendo a sua liquefação com expansão de 34% de seu volume (ponto triplo 64 °C). Este fato, juntamente com o continuado aumento do volume específico do líquido, com o posterior aumento de temperatura do UF₆, pode levar ao rompimento do cilindro e ao conseqüente rompimento da autoclave, resultando no vazamento do UF₆, vapor d'água e de seus produtos de hidrólise (UO₂, F₂ e HF) para o interior da sala.

Para a ocorrência deste acidente, é necessário que os seguintes eventos aconteçam:

- Falha no enchimento de cilindros na etapa final do enriquecimento (outro local) e;
- Falha no controle de peso do cilindro após as operações de homogeneização e amostragem líquida e;
- Falha no controle de peso de cilindros nos procedimentos de salvaguarda de material radioativo e;
- Falha no controle de peso de cilindros no pátio de estocagem (duas pesagens) e;
- Falha na pesagem de cilindros na autoclave.

Devido a diversos procedimentos de pesagens envolvidos, a frequência de ocorrência deste acidente é inferior a 1,0 E-07 por ano sendo, portanto, não crível. Além disso, com base na análise histórica, pode-se concluir que a frequência de ocorrência de acidentes envolvendo rompimento de cilindros em autoclaves é bastante baixa. Como exemplo, pode-se citar a experiência acumulada da fábrica que lidera a produção de combustível nuclear no Japão, operando há mais de 18 anos sem a ocorrência de qualquer liberação e a experiência da URENCO na Europa, operando há mais de 33 anos com a ocorrência de pequenos vazamentos internos sem rompimento de cilindros.

Por ser um acidente postulado, apesar de ser evento de baixa frequência, foi feita uma simulação, segundo o WASH 1284, cuja descrição do cenário é apresentado a adiante após a apresentação do *evento 2*, que pode também romper o cilindro.

◆ ***Evento 2 - Ruptura de cilindro de UF₆ devido ao superaquecimento com vazamento de UF₆ no interior da autoclave***

Neste evento, postula-se que a válvula reguladora de pressão de vapor de aquecimento da autoclave falhe, aumentando a pressão interna para 5 bar abs., correspondendo à pressão na tubulação de vapor antes da válvula. O vaso de pressão da autoclave não deve ser danificado, pois sua pressão de projeto é 7,0 bar abs..

A pressão interna da autoclave, ao atingir 3 bar abs., abre a válvula de alívio, direcionando o excesso de vapor para o lavador – aspersor. A tubulação de drenagem da autoclave também contribui para aliviar o excesso de pressão. O aumento de temperatura, caso ocorra, é detectado pelo indicador, alarme de temperatura e chave de intertravamento, com alarme sonoro e visual na Sala de Controle. Se esse aumento for excessivo, o Sistema de Vaporização é desligado automaticamente (intertravamento), fechando as válvulas de admissão na tubulação de vapor na autoclave, na tubulação do Sistema de CO₂, e na tubulação de saída de UF₆ da autoclave.

A frequência de ocorrência deste acidente é inferior a 1,0 E-07 por ano. Acidente não crível. Não é previsto dano de fatalidade para este evento.

Para efeito de simulação dos **eventos 1 e 2**, conforme WASH 1284, supõe-se que um cilindro de 2,5 ton de UF₆ rompe-se e que nenhuma ação corretiva seja tomada de imediato. Aproximadamente 700 kg de UF₆ são liberados na sala de evaporação, em 35 minutos, após o que, o restante do conteúdo do cilindro esfria e solidifica-se. O material liberado para a sala deverá ser conduzido, através do sistema de exaustão, e por uma filtragem constituída de pré-filtro (tipo F3) e filtro absoluto (A3), para a chaminé, sendo então liberado para a atmosfera. Durante a liberação, o UF₆ hidrolisa-se por contato com vapor d'água no ar e no sistema de exaustão, formando UO₂F₂ e HF.

Assume-se que, posteriormente, os filtros fiquem bloqueados com UF₆ hidrolisado, causando perda de carga e permitindo que gases de UF₆, HF e aerossóis de UO₂F₂ alcancem o exterior do Prédio de Produção. Admite-se que esta fuga represente 1% do urânio e 10% do HF que escapam do cilindro. Esta liberação corresponde a 6,12 kg de UO₂F₂, equivalentes a 4,67 kg de U enriquecido a 5% e a 15,9 kg de HF. Foi previsto também que a fuga se deu pelo teto do edifício a 12 m de altura. A liberação durou 35 minutos e foi feito o acompanhamento da nuvem por mais 35 minutos

Os cenários apresentados a seguir foram simulados pela Consultora em função das condições atmosféricas locais para os cálculos de consequências:

Efeitos radiológicos

Cenário 1

As concentrações no ar, sobre um ponto ao nível do solo, representam uma situação média durante os 35 minutos da passagem da nuvem. Ventos de leste, com velocidade média de 2,8 m/s de dia. Estabilidade atmosférica da classe C. Tempo bom.

As deposições no solo ocorrerem durante a passagem da nuvem. Ventos de leste, com velocidade média de 2,8 m/s de dia. Estabilidade atmosférica da classe C. Tempo bom.

Cenário 2

As concentrações no ar, sobre um ponto ao nível do solo, representam uma situação média durante os 35 minutos da passagem da nuvem. Ventos de leste, com velocidade média de 3,5 m/s de dia. Estabilidade atmosférica da classe D. Tempo chuvoso.

As deposições no solo ocorrerem durante a passagem da nuvem. Ventos de leste, com velocidade média de 3,5 m/s de dia. Estabilidade atmosférica da classe D. Tempo chuvoso.

Cenário 3

As concentrações no ar, sobre um ponto ao nível do solo, representam uma situação média durante os 35 minutos da passagem da nuvem. Ventos de oeste, com velocidade média de 1,9 m/s à noite. Estabilidade atmosférica da classe F. Tempo bom noturno.

As deposições no solo, ocorrerem durante a passagem da nuvem. Ventos de oeste, com velocidade média de 1,9 m/s à noite. Estabilidade atmosférica da classe F. Tempo bom noturno.

Tabela 5.15 RESUMO DAS SIMULAÇÕES VALORES MÁXIMOS DAS CONCENTRAÇÕES E DEPOSIÇÕES

Caso	Estabilidade de Pasquill	Distância (m)	Direção (graus)	Fator de diluição (s/m ³)	Concentração (Bq/m ³)	Depos. seca (Bq/m ²)	Depos. úmida (Bq/m ²)	Depos. total (Bq/m ²)	Total depositado (%)
4	C	100	180	2.42E-4	14,5	61,0	-	-	2,15
5	D	100	180	2.38E-4	14,3	60,0	963,0	1020,0	97,85
6	F	200	335	3.88E-5	2,3	9,8	-	-	10,38

A simulação da dispersão em distintos cenários meteorológicos resulta em mapas do total de material depositado no solo para cada um dos casos de impactos de acidentes, assim como em mapas das concentrações média no ar durante a passagem da nuvem pelos possíveis receptores posicionados no chão em torno das Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂. Os resultados mostram que a condição mais crítica encontra-se a 100 m do prédio da Unidade, dentro dos limites da FEC, não atingindo área de assentamento humano ou de cultivo. Assim sendo, nos cálculos de vulnerabilidade, os caminhos de doses serão calculados para inalação e exposição direta.

A concentração máxima seria de 14,4 Bq/m³ e a deposição de 1020 Bq/m². Apesar da duração do acidente ser de 35 minutos, foi considerado para o caminho por inalação um tempo de 1 hora e para exposição, o tempo de 1 ano. A dose total (inalação + exposição) é de 0,119 mSv/ano ou 0,000119 Sv/ano.

Efeitos físicos

Além do efeito físico da ruptura do cilindro e autoclave que é direto e imediato, pela projeção de debris que podem atingir os trabalhadores da sala do Sistema de Evaporação, foram avaliados os efeitos a exposição ao HF. Conforme mencionado anteriormente, quando do acidente de ruptura do cilindro, com fuga de UF₆, há formação de HF. A seguir, são apresentados os cenários estudados



para a simulação do evento e na Tabela 5.16 adiante o resumo dos resultados.

Cenário 1

Concentrações de HF no ar, ao nível do solo, 72 minutos depois, cálculo conservador, sem considerar o descarregamento das partículas. Hipótese de fuga do material pelo teto de 12 m de altura. Ventos de leste, com velocidade média de 2,8 m/s de dia. Estabilidade atmosférica da classe C. Tempo bom durante o dia. Os ventos de leste levam o material para o lado oeste. A concentração máxima foi 1,83mg/m³ e ocorreu a 100 m de distância do lado oeste da Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂.

Cenário 2

Concentrações de HF no ar, ao nível do solo, 72 minutos depois, cálculo conservador, sem considerar o descarregamento das partículas. Hipótese de fuga do material pelo teto de 12 m de altura. Ventos de leste, com velocidade média de 3,5 m/s de dia. Estabilidade atmosférica da classe D. Tempo tempestuoso durante o dia. Os ventos de leste levaram o material para o lado oeste. A concentração máxima foi 1,80 mg/m³ e ocorreu a 100 m de distância do lado oeste da Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂.

Cenário 3

Concentrações de HF no ar, ao nível do solo, 72 minutos depois, cálculo conservador, sem considerar o descarregamento das partículas. Hipótese de fuga do material pelo teto de 12 m de altura. Ventos de oeste, com velocidade média de 1,9 m/s à noite. Estabilidade atmosférica da classe F. Tempo bom. Os ventos de oeste/noroeste levaram o material para o lado Este/Sudeste. A concentração máxima foi 0,294 mg/m³ e ocorreu a 200 m de distância do lado Este/Sudeste da Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂.

Tabela 5.16 DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE HF
RUPTURA DE CILINDRO DE UF₆ e AUTOCLAVE

Caso	Estabilidade de Pasquill	Distância (m)	Concentração (mg/m ³)
7	C	100	1,83
8	D	100	1,80
9	F	200	0,29

As concentrações máximas obtidas no calculo da dispersão, na faixa de 1,8 mg/m³, estão abaixo da concentração de TLV de 3 ppm, ou seja não é previsto nenhum dano aos operadores pela presença do HF.

◆ **Evento 3 - Rompimento de Tubulação da Linha de Alimentação de UF₆**

Este evento pode ocorrer pelas seguintes falhas: defeitos de fabricação, corrosão, fadiga térmica, choque mecânico ou reaquecimento de linha obstruída por UF₆ sem ter procedido à sublimação prévia do UF₆ solidificado. A obstrução da linha de UF₆ pode ocorrer por falha no aquecimento da linha, o qual deve garantir vapor para a válvula que modula o fluxo de UF₆ ou traço elétrico para a tubulação.

A frequência de ocorrência deste acidente é de, aproximadamente, 8,3 E-04 por ano, levando em consideração a falha do traço elétrico (IEEE, 1984), a falha do aquecimento a vapor (IEEE, 1984) e a falha do operador em reaquecer a linha obstruída (ATALLAH, 1980), somadas à falha devido às rupturas em tubulações e válvulas (IEEE, 1984).

O maior vazamento possível de UF₆ seria na sala da autoclave (UFD.01-104a), onde a ruptura da tubulação de 25mm de diâmetro, a uma pressão de 5,2 bar abs (T = 100°C), causaria um vazamento de 46 g/s de UF₆ (correspondente a 31,8 g/s de U e 10,6g /s de HF). O volume da sala UFD.01-104a, com 15 m x 5 m x 6 m, equivalente a 450m³. A taxa de renovação de ar é de 0,95 m³/s. O U e HF formados possuem temperaturas maiores do que o ar ambiente e tendem a subir e a se misturar com o ar da sala. A exaustão do U e HF formados é, então, dificultada, pois a exaustão é no nível do piso.

Em caso de vazamento, supondo a não renovação de ar, um trabalhador desprotegido inalaria cerca de 16 mg de U e estaria exposto à concentração média de 706 mg/m³ de HF, em 30 segundos (tempo máximo para a atuação dos intertravamentos de segurança). A exposição ao HF seria fatal e a incorporação de U acarretaria danos permanentes nos rins. Contudo, para trabalhadores devidamente protegidos com EPI (equipamento de proteção individual) apropriado, as consequências seriam desprezíveis. Sendo esta a previsão a ser feita para a análise de vulnerabilidade

Do ponto de vista de consequências radiológicas, a inalação de 16 mg de U resultaria em dose equivalente efetiva de 1,2 mSv (1,2 E-03 Sv), que é bem inferior ao Limite Primário Anual de Dose Equivalente Efetiva para trabalhador, que é de 50 mSv.

◆ **Evento 4 - Incêndio de Metanol nos Filtros Rotativos**

O acidente envolve o incêndio de metanol nos filtros rotativos, na etapa de secagem de TCAU (Tricarbonato de Amônia e Uranilo). Esses filtros estão localizados na Sala UFD.01-109a. Considerou-se que cada filtro contém uma carga máxima de 134 kg de TCAU e de 150 l de metanol e que haja um incêndio de metanol que se propague para os dois filtros.

As possíveis causas para a ocorrência desse evento são:

- a) derramamento de uma carga do filtro no piso (causado, entre outros motivos, pela perda da bomba de vácuo em operação) e ignição dos vapores de metanol por alguma fonte de ignição próxima ou mesmo por eletricidade eletrostática; e
- b) vazamento de uma linha líquida de metanol (diâmetro nominal de 25 mm e pressão de 3 bar abs.) seguido de ignição.

A frequência de ocorrência estimada para este acidente é da ordem de 5,3 E-04 por ano, com uma intervalo de 95% de confiança variando de 1,4E-05 por ano a 2,0 E-03 por ano. Esta frequência foi obtida a partir da análise histórica de acidente, não havendo registro de ocorrência deste tipo de evento, nas mesmas condições de operação da FEC-II.

O incêndio de 300 litros de metanol ocorreria nos 375 m² (25 m x 15 m) do piso da sala 109a, em aproximadamente 12 segundos. A quantidade de urânio no TCAU é cerca de 224 kg, considerando-se os dois filtros. Desse total, cerca de 2,9 kg (1,3%) seria lançado ao ar em forma de partículas respiráveis (NUREG-1320). Esse total é menor que os 4,7 kg de urânio lançados para a atmosfera no cenário analisado nos *Eventos 1 e 2*. Além disso, há o efeito similar de subida da pluma quente. Assim, as consequências tóxicas e radiológicas são bem menores para o presente acidente do que as estimadas para o cenário analisado nos *Eventos 1 e 2*.

Além disso, a duração do incêndio é muito pequena para causar danos significativos a outros equipamentos. O vazamento de uma linha de metanol para o piso ocorreria a uma vazão máxima de 5,9 kg/s. Assim, a quantidade vazada em 30 segundos (tempo máximo para a atuação dos intertravamentos de segurança) seria de 177 kg, menor, portanto, do que a considerada na análise acima. Pelo tipo de acidente e volume, não é previsto danos de fatalidade aos operadores.

♦ *Evento 5 - Explosão de hidrogênio no forno de sinterização de pastilhas*

Outro acidente postulado é a explosão do forno de sinterização. As pastilhas de UO₂ são sinterizadas em fornos com atmosfera redutora de hidrogênio. A operação é cuidadosamente controlada de modo a prevenir o desenvolvimento de uma atmosfera explosiva. Admite-se que estes controles falhem ocasionando a explosão do forno.

A explosão de hidrogênio, localizado na sala UFD.01-113, pode ter como origem as condições operacionais descritas a seguir:

- a) purga inicial errônea ou incompleta devido ao erro do operador e/ou à falha no detector de umidade;
- b) falha na abertura das portas de alimentação e de descarga das pastilhas, permitindo a abertura simultânea das portas. Esta condição pode ser resultado de uma falha no Sistema Pneumático de Atuação das Comportas;
- c) aumento de vazão de H₂ devido à falha na válvula redutora de pressão. Esta condição pode ser originada por emperramento ou choque mecânico na válvula de redução;
- d) falha no resfriamento do forno, com superaquecimento e deformação da carcaça. Esta falha pode ser originada de entupimento, corrosão, ruptura de tubulações e válvulas ou falha no resfriamento da carcaça do forno; e
- e) perda de alimentação de H₂ e falha no suprimento de N₂. Esta condição pode ter origem na ruptura de tubulações ou válvulas da linha de H₂, conjuntamente com a obstrução ou ruptura de tubulações ou válvulas da linha de N₂.

A frequência de ocorrência estimada anteriormente para este acidente é da ordem de 5,3 E-04 por ano, com um intervalo de 95% de confiança variando de 1,4 E-05 por ano a 2,0 E-03 por ano. Esta frequência foi obtida a partir da análise histórica de acidentes, não havendo registro de ocorrência deste tipo de evento, nas condições de operação da FEC-II.



Efeito Físico

O volume útil aproximado do forno é de 0,16m³. O volume total é de, aproximadamente, 8m³, a maior parte preenchida por material refratário. O forno opera com pressão levemente acima da pressão atmosférica (15-20 mbarg). O forno é alimentado a uma taxa de 6 Nm³/h de hidrogênio. A acumulação de H₂ nos interstícios dos refratários do forno é considerada, assumindo-se que o volume de H₂ seja 5 vezes maior que o volume útil do forno, ou seja, um volume total de 0,8 m³, equivalente a 0,071 kg de H₂.

As consequências de uma explosão de H₂ foram estimadas com base nos resultados do código WHAZAN. Neste cenário o forno será danificado, uma vez que até uma distância de 2,8m a sobrepressão é de 4 bar o que corresponde à destruição de equipamentos.

Efeito Radiológico

Assume-se que o forno contém 156 kg de urânio, todo na forma de pastilhas de UO₂ e que todo o urânio é expelido. É improvável que algum urânio seja liberado para o exterior do Prédio de Produção. Entretanto, admite-se que 1,56 kg (1%) de urânio alcance o lado externo do prédio.

Os cenários descritos abaixo foram simulados pela Consultora em função das características atmosféricas locais, para a avaliação de consequências e os resultados estão sumarizados na Tabela 5.17 adiante.

Cenário 1

Concentrações no ar, ao nível do solo, 12 minutos depois, sem considerar o descarregamento das partículas. Hipótese de fuga do material pelo teto de 12 m de altura. **Ventos de Leste, com velocidade média de 2,8 m/s durante o dia, estabilidade atmosférica classe C. Tempo bom**

Deposição no solo a partir do minuto 1 até 12 minutos depois. Hipótese de fuga do material pelo teto de 12 m de altura. **Ventos de Leste, com velocidade média de 2,8 m/s durante o dia, estabilidade atmosférica classe C. Tempo bom.**

Cenário 2

Concentrações no ar, ao nível do solo, 12 minutos depois, sem considerar o descarregamento das partículas. Hipótese de fuga do material pelo teto de 12 m de altura. **Ventos de leste, velocidade média de 3,5 m/s durante o dia, estabilidade atmosférica de classe D. Tempo tempestuoso**

Deposição no solo a partir do minuto 1 até 12 minutos depois. Hipótese de fuga do material pelo teto de 12 m de altura. **Ventos de leste, velocidade média de 3,5 m/s durante o dia. Estabilidade atmosférica classe D. Tempo Tempestuoso**

Cenário 3

Concentrações no ar, ao nível do solo, 12 minutos depois, sem considerar o descarregamento das

partículas. Hipótese de fuga do material pelo teto de 12 m de altura. **Ventos de oeste, com velocidade média de 1,9 m/s durante a noite. Estabilidade atmosférica da classe F. Tempo bom à noite.**

Deposição no solo a partir do minuto 1 até 12 minutos depois. Hipótese de fuga do material pelo teto de 12 m de altura. **Ventos de oeste, com velocidade média de 1,9 m/s durante a noite. Estabilidade atmosférica da classe F. Tempo bom noturno**

Tabela 5.17 RESUMO DAS SIMULAÇÕES VALORES MÁXIMOS DAS CONCENTRAÇÕES E DEPOSIÇÕES

Caso	Estabilidade de Pasquill	Distância (m)	Direção (graus)	Fator de diluição (s/m ³)	Concentração (Bq/m ³)	Depos. seca (Bq/m ²)	Depos. úmida (Bq/m ²)	Depos. total (Bq/m ²)	Total depositado (%)
1	C	100	180	2.42E-4	16,4	19,7	-	-	1,18
2	D	100	180	2.38E-4	16,2	19,4	311,0	331,0	43,71
3	F	200	335	3.82E-5	2,60	3,12	-	-	2,52

A concentração máxima seria de 16,4 Bq/m³ e a deposição de 331 Bq/m². Apesar da duração do acidente ser de 12 minutos, foi considerado para o caminho por inalação um tempo de 1 hora e para exposição, o tempo de 1 ano. A dose total (inalação+exposição) é de 0,135 mSv/ano ou 0,000135 Sv/ano.

♦ **Evento 6 - Explosão de Hidrogênio no Forno Leito Fluidizado de Redução**

A explosão de hidrogênio no forno de leito fluidizado instalado na sala UFD.01/109g pode ter como origem as condições operacionais descritas a seguir:

- purga inicial incompleta devido ao erro do operador e/ou à falha no sistema de controle do forno
- falha na injeção de vapor devido a falhas nas tubulações e válvulas, conjuntamente com a falha do intertravamento que fecha a válvula de alimentação de H₂ e abre a válvula de selagem de N₂;
e
- aumento de vazão de H₂ devido à falha na válvula redutora de pressão (esta condição pode ter origem no emperramento ou choque mecânico na válvula de redução de pressão), conjuntamente com a falha do intertravamento citado em b).

A frequência de ocorrência estimada anteriormente para este acidente é da ordem de 5,3 E-04 por ano, com um intervalo de 95% de confiança variando de 1,4 E-05 por ano a 2,0 E-03 por ano. Esta frequência foi obtida a parti da análise histórica de acidentes, não havendo registro de ocorrência deste tipo de evento, nas mesmas condições de operação da FEC-II.

O volume útil aproximado do forno é de 0,31 m³. A pressão máxima de operação é de 1,5 bar abs. e a temperatura mínima é de 500 °C. Nessas condições, a massa máxima de H₂ no forno é da ordem de 14 gramas. Assumindo-se, conservadoramente, que todo o volume útil seja ocupado por hidrogênio e que ocorra a ignição de uma eventual mistura explosiva, o forno será destruído, já que

a sobrepressão ultrapassando 4 bar numa distância radial de 1,6m o dano resultante é de destruição de equipamento.

Como consequência da explosão do forno, pode haver a liberação de pó de TCAU e/ou de UO₂, dependendo da fase da redução no forno. Como a capacidade do forno é 121 kg de urânio e a quantidade máxima de H₂ envolvida na explosão é menor que 14 g.

As consequências tóxicas e radiológicas para os trabalhadores e para os indivíduos do público serão inferiores àquelas estimadas para o cenário no **Evento 5** (Explosão de H₂ no Forno de Sinterização de Pastilhas).

◆ **Evento 7 - Explosão de Hidrogênio em Lavador de Gases**

A explosão dos lavadores de gases (2), instalados na sala UFD.01-109g, pode ocorrer devido à formação de mistura explosiva de H₂. O H₂ presente nos lavadores de gases tem origem nas falhas do forno de leito fluidizado identificadas no **Evento 6**. Para o lavador, a explosão só ocorre se falhar, também, a injeção de ar de diluição na linha de gases, que assegura a não formação de mistura explosiva.

A frequência de ocorrência estimada para este acidente é da ordem de 5,3 E-04 por ano, com um intervalo de 95% de confiança variando de 1,4 E-05 por ano a 2,0 E-03 por ano. Esta frequência foi obtida a partir da análise histórica de acidentes, não havendo registro de ocorrência deste tipo de evento, nas mesmas condições de operação da FEC-II.

Os volumes úteis dos lavadores são, respectivamente, 0,125 m³ e 0,07 m³. A pressão máxima de operação é da ordem de 1,0 bar abs. As temperaturas de operação dos lavadores são, respectivamente, 50 °C e 25 °C. Como as condições operacionais são similares, considerou-se a explosão para o lavador maior. A massa máxima de H₂ nesse lavador é cerca de 11 gramas.

Assumindo-se, conservadoramente, que todo o volume útil seja ocupado por hidrogênio e que ocorra a ignição de uma eventual mistura explosiva de H₂ e O₂, o lavador será danificado, já que a sobrepressão ultrapassa 4 bar numa distância radial de 1,0 m.

A explosão pode causar danos reparáveis ao outro lavador e ao forno de leito fluidizado. Há também a possibilidade de ocorrência de mísseis. Assim, por exemplo, um estilhaço de 50 kg poderia ser lançado com uma velocidade de 22 m/s e energia cinética de 12 kJ (Word Bank, 1988). Esse míssil poderia penetrar 9 mm numa parede grossa de concreto. Projéteis menores poderiam chegar a furar o teto. Assim, por exemplo, a penetração para um projétil de 1 kg em aço seria da ordem de 1 mm, insuficiente para danificar os vasos próximos. Deve ser ressaltado que a análise de mísseis é bastante especulativa, pois o efeito do míssil depende, além dos fatores já considerados, de sua forma e de como ocorre o impacto.

Este evento não tem consequência de danos físico ou radiológico externo mensurável.

◆ **Evento 8 - Explosão de Nitrato de Amônio em Lavador-Aspersor de Gases**



A explosão do lavador-aspersor de gases, instalado na sala UFD.01-109a, pode ser originada pelo acúmulo de nitrato e traços de nitrito de amônio associado à falha do controlador de nível baixo.

O acúmulo de nitrato e traços de nitrito de amônio, o aumento de concentração e o aquecimento da mistura de circulação (pelo aquecimento do motor da bomba de circulação ao bombear material muito denso, no caso de falha por nível baixo) formam um ambiente propício para desencadear uma explosão, o que pode ser iniciado por um choque mecânico.

A frequência de ocorrência estimada para este acidente é da ordem de 6,2 E-04 por ano, com um intervalo de 95% de confiança variando de 1,6 E-05 por ano a 2,3 E-03 por ano. Esta frequência foi obtida a partir da análise histórica de acidentes, havendo registro de uma ocorrência deste tipo de evento, nas mesmas condições de operação da FEC-II, ocorrido em Hanau, na Alemanha (ver Tabela 5.4).

O volume útil do lavador é de 0,07m³. A pressão máxima de operação é cerca de 1,0 bar abs. e a temperatura de operação é de 30 °C. O volume no nível extra baixo é cerca de 0,007m³. De acordo com o acidente de Hanau, a concentração de nitrato e nitrito de amônio e de outros compostos não chegou a mais de 50% da solução no lavador no nível mais baixo. A massa máxima de nitrato seria da ordem de 5,6 kg.

O lavador é danificado com a explosão, já que a sobrepressão ultrapassa 4 bar numa distância radial de 3,3 m. A explosão pode destruir o tanque e a bomba de metanol, respectivamente, com a possibilidade de ignição subsequente, assim como o vaso coletor de água carbonatada e o vaso de acumulação. Além disso, pode causar danos reparáveis ao vaso acumulador de filtrado de TCAU e os outros componentes menos importantes. O vaso de vidro do lavador pode ser estilhaçado gerando, principalmente, pequenos mísseis.

Este evento não tem consequências em termos de danos físicos ou radiológicos externo mensuráveis.

◆ *Evento 9 - Explosão/Incêndio de Pó de UO₂ no Vaso de Passivação*

O acidente envolve a explosão de pó de UO₂ no Vaso de Passivação, localizado logo abaixo do forno de leito fluidizado, na sala UFD.01-109 seguida de deflagração e incêndio.

A frequência de ocorrência estimada para este acidente é da ordem de 5,3 E-04 por ano, com um intervalo de 95% de confiança variando de 1,4 E-05 por ano a 2,0 E-03 por ano. Esta frequência foi obtida a partir da análise histórica de acidentes, não havendo registro de ocorrência deste tipo de evento, nas mesmas condições de operação da FEC-II.

O volume útil do Vaso de Passivação é de 0,073m³. A pressão máxima de operação é cerca de 0,5 bar abs. e a temperatura de operação varia de 25 a 400 °C. A massa máxima de UO₂ no vaso é de 137 kg, o que equivale a 121 kg de urânio. Assumindo-se, conservadoramente, que todo o volume útil seja ocupado por ar (9,4 g de O₂) e que ocorra a ignição de uma eventual mistura explosiva de pó de UO₂ e ar, o vaso pode ser destruído ou, pelo menos, distorcido, já que a sobrepressão ultrapassa 4 bar numa distância radial de 0,2m, da ordem das dimensões externas do vaso. É razoavelmente improvável que a explosão cause danos aos lavadores de gases e ao forno de leito

fluidizado.

Desse modo, a quantidade máxima de 18,4 kg de U₃ é convertida a U₄, a cada batelada, liberando 4,5 MJ. Como consequência de uma eventual explosão do vaso de passivação, haverá uma possível formação de pó de UO₂, não passivado, que pode deflagrar externamente ao vaso o incendiar-se a equação empírica que engloba os dados experimentais que relacionam porcentagem de pó que se dispersa no ar em função da energia liberada na explosão (USAEC, WASH-1284), a quantidade máxima de pó de UO₂ que pode se dispersar na sala do forno de leito fluidizado seria de 3,5 kg, com um diâmetro médio das partículas de 400 micra.

Do material particulado lançado ao ar, cerca de 0,13 kg estaria na faixa respirável de 0 a 10 micra de diâmetro. Um eventual incêndio do UO₂ não passivado pode liberar cerca de 0,053% de pó, o correspondente a cerca de 64 g de U, dentro da faixa respirável (NUREG-1320). Em ambos os casos, as doses seriam menores que as calculadas para o cenário analisado **Evento 5** (Explosão de Hidrogênio no Forno de Sinterização). Não é estimado dano de fatalidade para o operador.

◆ **Evento 10 - Explosão em nuvem não confinada de GLP no interior do Prédio**

O acidente envolve a explosão de GLP no interior do Prédio da Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂, na sala UFD01.113.

A explosão pode ocorrer após um vazamento decorrente de vibração, choque mecânico, falha em válvulas, defeito de fabricação na tubulação ou válvula, o que levaria à formação de uma mistura explosiva com o ar, com posterior ignição.

Para que ocorra um acidente com GLP na sala de sinterização de pastilhas é necessário que ocorram, simultaneamente, algumas combinações dos seguintes cenários:

- ocorra um vazamento de GLP;
- o Sistema de Exaustão não esteja funcionando;
- o alarme por baixa pressão de GLP não atue;
- a chama piloto apague;
- o intertravamento por baixa temperatura da chama de GLP não atue;
- o operador não detecte o vazamento ou não atue adequadamente;
- haja formação de mistura explosiva junto ao piso; e
- ocorra ignição.

A frequência de ocorrência deste acidente é inferior a 1,0 E-07 por ano, incluindo todos os possíveis cenários. Conforme classificação do DOE-STD-3011-94, Guidance for Preparation of Technical Safety Requirements (TSR), Nuclear Safety Analysis Reports (SARs) and Implementation Plans (Ips) esta ocorrência é extremamente remota, pode-se afirmar, portanto, que este acidente é não crível.

◆ **Evento 11 – Explosão em nuvem de amônia**

O acidente envolve a explosão em nuvem não confinada de Amônia – NH₃ - na área externa 331-



USN01, no Pátio de Estocagem. Este acidente pode ser originado de vazamento/ruptura decorrente de vibração, choque mecânico, corrosão ou defeito de fabricação nos tanques, tubulação ou válvulas nas linhas de amônia, resultando na dispersão de NH₃ para a atmosfera, com formação de nuvem explosiva.

A frequência de ocorrência de explosões em nuvem não confinada de amônia devido a grandes vazamentos, incluindo rupturas catastróficas, é da ordem de 1,0 E-06 por ano.

Uma explosão em nuvem não confinada (UCVE – Unconfined Vapor Cloud Explosion) de amônia pode ocorrer segundo vários tipos de cenários, sendo os mais importantes apresentados a seguir:

Cenário 1: UVCE imediata ou retardada devido ao rompimento de um dos dois tanques de estocagem de 9 t, os quais possuem dique de contenção;

Cenário 2: UVCE retardada devido ao rompimento de uma linha líquida de 80 mm de diâmetro (19,4 kg/s), com pressão de 8,3 bar abs, na área do dique;

Cenário 3: UVCE retardada devido ao rompimento de uma linha líquida de 50 mm de diâmetro (7,6 kg/s), com pressão de 8,3 bar abs, fora da área do dique.

Utilizando-se o código WHAZAN, assumiu-se que a pressão da Amônia a 20 °C é de 8,3 bar abs. Considerou-se a classe de estabilidade atmosférica F, com velocidade média do vento de 1 m/s. Para o cenário 1, considerou-se evaporação imediata e que a massa de aerossol corresponde ao dobro da massa gaseificada instantaneamente. O vazamento líquido foi considerado bifásico para os cenários 2 e 3 para simular um aerossol composto de líquido e gás. Na Tabela 5.18 abaixo são apresentados os resultados da simulação.

Tabela 5.18 RAIOS DE SOBREPRESSÃO DO EVENTO DE EXPLOSÃO DE AMÔNIA.

Sobrepessão – mJ ^{-1/3}	Distância ao Centro da Explosão (m)		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
0,03	54	40	24
0,06 – 100 % fatalidades	108	79	47
0,15 - ferimentos	270	200	120
Distância do Centro da Explosão ao Local de Vazamento (m)	9 a 43	42 a 98	30 a 66
Taxa de Vazamento	2.860 kg (instantâneo)	19,4 kg/s	7,6 kg/s
Massa da Nuvem (kg)	2.860	1.110	236

O cenário 1 é o mais grave dos 3 analisados e, dependendo da direção do vento, pode destruir o Pátio de Estocagem. Apesar do som da explosão poder ser ouvida a distância maior que o limite da Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂ (450 m), os danos permanecem em seus limites (270m). Cabe ressaltar que a frequência de ocorrência deste evento é classificada como de eventos raros e aceitável quando comparáveis aos padrões da indústria química inglesa (KLETZ, 1985).

◆ **Evento 12 - Explosão em nuvem de GLP externamente**

O acidente envolve a explosão em nuvem não confinada de GLP na área externa 341-USN01, no Pátio de Estocagem. As causas que podem levar à ocorrência do acidente são:

- vazamento ou ruptura decorrente de vibração, choque mecânico, corrosão ou defeito de fabricação no tanque, tubulação ou válvulas, ou falha na válvula de alívio levando a formação de uma mistura explosiva com o ar e posterior ignição; e

- o vazamento principal ocorre na fase líquida (~30 vezes maior do que a forma gasosa).

A frequência de ocorrência de explosões não confinadas de GLP devido a grandes vazamentos,

incluindo rupturas catastróficas é da ordem de 5,0 E-07 por ano.

Uma explosão em nuvem não confinada de GLP pode ocorrer segundo vários tipos de cenários, sendo os mais importantes apresentados a seguir:

Cenário 1: UVCE imediata ou retardada, devido ao rompimento do tanque de estocagem de 10 t, o qual não têm dique de contenção e;

Cenário 2: UVCE retardada, devido ao rompimento de uma tubulação de GLP líquido de 25 mm de diâmetro (2,2 kg/s) ou de uma tubulação de GLP gasoso de 40 mm de diâmetro (1,1 kg/s).

Utilizando-se o código WHAZAN , assumiu-se que a pressão do GLP a 20 °C e de 8,4 bar abs. Considerou-se a classe de estabilidade atmosférica F, com velocidade média do vento de 1 m/s. O vazamento líquido foi considerado bifásico, assumindo-se a evaporação imediata, já que não há dique de contenção. Os resultados das explosões UVCE são apresentados na Tabela 5.19 abaixo.

Tabela 5.19 RAIOS DE SOBREPRESSÃO DO EVENTO EXPLOSÃO DE NUVEM DE GLP

Sobrepessão – mJ ^{-1/3}	CENÁRIO 1		CENÁRIO 2
	IGNIÇÃO IMEDIATA	IGNIÇÃO RETARDADA	TUBULAÇÃO DE LÍQUIDO
0,03	85	85	33
0,06 – 100% fatalidade	171	171	66
0,15 - ferimentos	427	427	165
Distância do Centro da Explosão ao Local de Vazamento (m)	0	0-280	45-111

Apesar de ser um acidente grave, suas consequências ficam restritas aos limites da propriedade da INB (427 m). O Pátio de Estocagem pode ser danificado no raio de 85 m.

◆ *Evento 13 – Vazamento Tóxico Externo de Amônia*

O evento acidental envolve o vazamento de amônia em área externa à Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂, sub-área 331-USM01, do Pátio de Estocagem.

O vazamento e/ou ruptura podem ser decorrentes de vibração, choque mecânico, falha em válvulas ou defeito de fabricação em tubulação ou válvula nas tubulações de amônia, resultando na liberação de NH₃ para a atmosfera, com a formação de nuvem tóxica e explosiva, a exemplo do acidente descrito no *evento 11* , sendo que a única diferença é a suposição de que não haja ignição da nuvem.

O tanque possui uma rede de água sob a forma de anel no seu entorno, que serve para resfriamento como para abatimento do gás em caso de vazamento. A frequência de ocorrência de vazamentos grandes e não isoláveis, incluindo ruptura catastrófica de tanques, é da ordem de 2,0 E-05 a 2,0 E-06 por ano.

O vazamento pode ocorrer segundo vários tipos de cenários, sendo que os importantes são apresentados a seguir:

Cenário 1: Vazamento tóxico externo devido ao rompimento de um dos dois tanques de estocagem de 9 t, os quais possuem dique de contenção;

Cenário 2: Vazamento tóxico devido ao rompimento de uma linha líquida de 80 mm de diâmetro (2,9 kg/s), com pressão de 8,3 bar abs., fora da área do dique;

Cenário 3: Vazamento tóxico devido ao rompimento de uma linha líquida de 50 mm de diâmetro (1,9 kg/s), com pressão de 8,3 bar abs., fora da área do dique.

Utilizando-se o código WHAZAN, assumiu-se que a pressão da Amônia a 20 °C é de 8,3 bar abs. Considerou-se a classe de estabilidade atmosférica F, com velocidade média do vento de 1 m/s. Para o cenário 1, considerou-se evaporação imediata e que a massa de aerossol corresponde ao dobro da massa gaseificada instantaneamente. O vazamento líquido foi considerado bifásico para os cenários 2 e 3 para simular um aerossol composto de líquido e gás. Para simular as gotículas líquidas no aerossol formado no Cenário 1, considerou-se que a massa de aerossol corresponde ao dobro da massa “flasheada” (gaseificada instantaneamente), assumindo-se a evaporação imediata.

Nestas condições, no Cenário 1 ocorre a liberação de 2.860 kg de vapor. Assume-se que o restante fique contido na área do dique e que os vapores exalados do dique (cerca de 0,7 kg/s) sejam abatidos pela atuação do dispositivo de abatimento de vapores de amônia.

Para o Cenário 1, vazamento instantâneo, o caso de 1% de fatalidade ocorreria até uma distância de 350 m caso o indivíduo ficasse parado durante a passagem da nuvem. Para o Cenário 2 e 3, a distância máxima para 1% de fatalidade seria de 500 e 450 m respectivamente, também se o indivíduo ficasse parado. Para os três cenários os casos de fatalidade ocorre dentro ou próximo aos limites da FEC (450 m).

◆ *Evento 14 – Vazamento Tóxico Externo de GLP*

O acidente postulado envolve o vazamento tóxico de GLP na área externa 341-USNO1, no pátio de estocagem.

As causas que podem levar à ocorrência deste acidente são:

- vazamento ou ruptura na tubulação, nas válvulas, nos tanques ou falha na válvula de alívio; e
- o vazamento principal ocorre na fase líquida (~30 vezes maior do que na forma gasosa).

Estas causas são idênticas às do acidente descrito no evento 12, sendo que a única diferença é a suposição de que não haja ignição da nuvem.

Caso ocorra a ruptura com vazamento, esta pode ser detectada pelo acionamento do alarme do Sistema de Gás Liquefeito de Petróleo, ligado ao transmissor e indicador de pressão. A frequência de ocorrência de vazamentos grandes e não isoláveis, incluindo ruptura catastrófica de tanque, é da ordem de 1,0 E-05 a 1,0 E-06 por ano.

O vazamento pode ocorrer segundo vários tipos de cenários, sendo os mais importantes apresentados a seguir:

- Cenário 1: vazamento instantâneo, devido ao rompimento do tanque de estocagem de 10 t, o qual não tem dique de concentração; e
- Cenário 2: vazamento devido ao rompimento de uma linha líquida de 25 mm de diâmetro (2,2 kg/s) ou de uma linha gasosa de 40 mm de diâmetro (1,6 kg/s).

Utilizando-se o código WHAZAN, assumiu-se que a pressão do GLP a 20 °C e de 8,4 bar abs. Considerou-se a classe de estabilidade atmosférica F, com velocidade média do vento de 1 m/s. O vazamento líquido foi considerado bifásico, assumindo-se a evaporação imediata, já que não há dique de contenção.

Não existe concentração tóxica de fatalidade fora dos limites da FEC. Supondo a toxicidade do GLP (mistura propano/butano) como semelhante a do propano, a concentração de IDHL, 21.000 ppm, ocorreria em até 600 m, bem próximo aos limites da FEC. Valendo ressaltar que esta concentração não é a de fatalidade. O risco de vida ou dano a saúde somente ocorreria se dano a saúde ou a vida caso o indivíduo ficasse 30 minutos parado, respirando o ar com esta concentração. Para o Cenário 2, o IDHL ocorreria em 90 m.

◆ *Evento 15 - Incêndio Externo de Amônia*

O acidente postulado envolve o incêndio de amônia em área externa à Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂ de pó (331-USM01), no pátio de estocagem.

Este acidente pode ser originado de um vazamento/ruptura decorrente de vibração, choque mecânico, falha em válvulas ou defeito de fabricação na tubulação ou válvulas nas linhas de amônia, resultando na dispersão de NH₃ para a atmosfera, com a formação de nuvem tóxica e explosiva. Pode então ocorrer um “BLEVE” (“Boiling Liquid Expanding vapor Explosion”) com efeito de “Bola de Fogo” (deflagração instantânea, apenas, e não a detonação e explosão da nuvem). Pode ocorrer, também, um “Flash Fire” (deflagração) retardada da nuvem de vapor. Além desses cenários, pode ocorrer um incêndio em jato ou um incêndio em poça, este último não confinado ou dentro do dique.

A frequência de ocorrência de incêndios devido a grandes vazamentos, incluindo rupturas catastróficas, é da ordem de 1,0 E-05 a 2,0 E-07 por ano.

Como há várias possibilidades de incêndio, selecionou-se apenas os cenários acidentais considerados mais importantes, os quais são descritos a seguir:

- Cenário 1: “BLEVE” imediato ou “Flash Fire” retardado, com formação de “Bola de Fogo”, devido ao rompimento de um dos dois tanques de estocagem de 9 t, sendo que esse tanques possuem dique de contenção. Esse cenário inclui o vazamento catastrófico de uma linha líquida de 80 mm ou 50 mm, cuja duração do vazamento é de apenas alguns minutos;

- Cenário 2: incêndio em jato de vazamento de uma linha líquida de 50 mm;
- Cenário 3: “Flash Fire” de uma nuvem de vapor devido ao vazamento de linha gasosa de 50 mm de diâmetro (válvula de alívio);
- Cenário 4: incêndio em poça, não confinado, de um vazamento de linha líquida de 50 mm; e
- Cenário 5: incêndio em poça, confinado na área do dique de contenção.

Utilizando-se o código WHAZAN, assumiu-se que a pressão da amônia a 20°C é de 8,3 bar abs. Considerou-se a classe de estabilidade atmosférica F, com velocidade média do vento de 1 m/s. O vazamento líquido foi considerado bifásico para os Cenários 2 e 4, para simular um aerossol composto de líquido e gás. Para simular as gotículas líquidas no aerossol formado no Cenário 1, considerou-se que a massa de aerossol corresponde ao dobro da massa “flasheada” (gaseificada instantaneamente).

O Cenário 1 (“BLEVE/Flash Fire”) é o mais grave dentre os cenários analisados e, dependendo da direção do vento, pode danificar parte do parque de tancagem (GLP, H₂, CO₂ e Metanol), além da caldeira e de parte do prédio da FEC-II. Assim, outros acidentes envolvendo vazamentos e outras substâncias no parque de tancagem poderiam ocorrer por efeito dominó. Como consequência, poderia ocorrer cerca de 100% de fatalidade num raio de 44 a 58 m, com o centro do “BLEVE/Flash Fire”, em até 280 m dos tanques de NH₃.

O Cenário 2 (Jato de Fogo) causa efeitos direcionais até um distância de 42 m com diâmetro de 6 m, podendo atingir o outro tanque de amônia ou os tanques de GLP ou metanol, dependendo da direção do vento.

O Cenário 3 (Flash Fire) é o segundo mais importante, com raio de fatalidade de 39 m, com o centro do cenário entre 120 e 210 m do ponto de vazamento.

Os Cenários 4 e 5 (incêndios em poça) são bastante localizados, embora possam eventualmente atingir o outro tanque de amônia ou as tubulações no pátio de estocagem.

Os indivíduos do público (além de 450 m) não seriam atingidos em nenhum dos casos com radiação térmica maior que 1,6 kW/m², a qual não causaria morte para os tempos máximos de exposição calculados.

Cabe ressaltar que a frequência de ocorrência deste acidente é aceitável quando comparada aos padrões da indústria química inglesa (KLETZ, 1985).

◆ *Evento 16 - Incêndio Externo de GLP*

O acidente postulado envolve o incêndio de GLP em área externa (341-USNO1), no pátio de estocagem.

As causas que podem levar à ocorrência deste acidente são:

- vazamento ou ruptura na tubulação, nas válvulas, nos tanques ou falha na válvula de alívio; e
- o vazamento principal ocorre na fase líquida (~30 vezes maior do que na forma gasosa).

A frequência de ocorrência de incêndios devido a grandes vazamentos, incluindo ruptura catastrófica, é da ordem de 1,0 E-07 a 5,0 E-06 por ano.

O vazamento não confinado de GLP, seguido de algum tipo de incêndio, pode ocorrer segundo vários tipos de cenários, sendo os mais importantes apresentados a seguir:

- Cenário 1: vazamento instantâneo e ocorrência de “BLEVE” imediato ou “Flash Fire” retardado, com a formação de “Bola de Fogo”, devido ao rompimento do tanque de estocagem de 10 t, o qual não tem dique de contenção;
- Cenário 2: “Flash Fire” de uma nuvem de vapor devido ao rompimento de uma linha líquida de 25 mm de diâmetro (2,2 kg/s) ou de uma linha gasosa de 40 mm de diâmetro (1,6 a 2,5 kg/s);
- Cenário 3: incêndio em jato de vazamento de uma linha líquida de 25 mm; e
- Cenário 4: incêndio, em poça, não confinado de uma ruptura do tanque.

Utilizando-se o código WHAZAN , assumiu-se que a pressão do GLP a 20 °C e de 8,4 bar abs. Considerou-se a classe de estabilidade atmosférica F, com velocidade média do vento de 1 m/s. O vazamento líquido foi considerado bifásico, assumindo-se a evaporação imediata, já que não há dique de contenção. Os resultados obtidos são:

O Cenário 1 (“BLEVE/Flash Fire”) é o mais grave dentre os cenários analisados e, dependendo da direção do vento, pode destruir o parque de estocagem (NH₃, H₂, CO₂ e Metanol), além da caldeira e de parte do prédio da FEC-II. Assim, outros acidentes envolvendo vazamentos de outras substâncias no parque de estocagem poderiam ocorrer por efeito dominó. Como consequência, poderia ocorrer cerca de 100% de fatalidade num raio de 84 a 97 m, com o centro do “BLEVE/Flash Fire”, em até 280 m do tanque de GLP. Seriam causadas mortes e queimaduras de 1º grau para indivíduos localizados até 450 m da instalação.

Cabe ressaltar que a frequência de ocorrência deste acidente é aceitável quando comparada aos padrões da indústria química inglesa (KLETZ, 1985).

◆ *Evento 17 - Incêndio Externo de Hidrogênio*

O acidente postulado envolve o vazamento de hidrogênio estocado em área externa às Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂ (333-USG-02), no Pátio de Estocagem, seguido de ignição com incêndio.

O vazamento/ruptura pode ser decorrente de vibração, choque mecânico, corrosão ou defeito de fabricação nos tanques, tubulação ou válvulas nas linhas de hidrogênio, resultando na liberação de H₂, seguida de incêndio.

A frequência de ocorrência de incêndios devido a grandes vazamentos é da ordem de 2,0 E-06 a 1,0 E-05 por ano.

O hidrogênio é estocado em tanques de até 17 m³, a uma pressão de 200 bar abs, contendo cerca de 288 kg e H₂ (3.200 Nm³). A pressão é reduzida para 7 bar antes de sua distribuição. O maior diâmetro das tubulações de H₂ é de 25 mm, tanto para 200 bar quanto para 7 bar. O comprimento da tubulação de 200 bar é de, aproximadamente, 10 m enquanto que o da linha de 7 bar é de 100 m.

Utilizando-se o código WHAZAN, constatou-se que na ocorrência de um vazamento instantâneo de um tanque, o hidrogênio se expandiria instantaneamente para uma concentração abaixo do seu limite inferior de inflamabilidade (4,1%). Assim, não há a possibilidade de uma explosão não confinada de vapor para esse tipo de cenário acidental. Já no caso de rompimento de uma das tubulações externas, há apenas a possibilidade de formação de incêndio em jato.

O incêndio em jato, envolvendo a tubulação externa com pressão de 200 bar e diâmetro de 25 mm, ofereceria perigo maior aos trabalhadores até uma distância de 118 m, com um raio máximo de 39 m, do ponto de vazamento. O trabalhador localizado nessa faixa teria que escapar em poucos segundos, para evitar danos graves. Todo o Pátio de Estocagem, mais a face norte de projeto do prédio principal, bem como as pessoas expostas numa faixa de 78 m em volta ao jato e a menos de 118 m o ponto de vazamento, seriam vulneráveis a esse tipo de acidente.

◆ *Evento 18 - Incêndio Externo de Metanol*

O acidente postulado envolve o incêndio de metanol em área externa à Unidades de Produção de Pó de UO₂ (332-USP01), no Pátio de Estocagem.

Este acidente pode ser originado de vazamento/ruptura decorrente de vibração, choque mecânico, falha em tanques, válvulas ou defeito de fabricação na tubulação ou válvulas nas linhas de metanol, resultando no vazamento de metanol líquido, ou para dentro ou para fora da área do dique de contenção, com possibilidade de ocorrência de incêndio em poça. Outros tipos de incêndio são menos importantes, já que o metanol é pouco volátil à temperatura ambiente e possui limite inferior de inflamabilidade relativamente alto (7,3%), e também é estocado e manuseado a baixas pressões (1 a 3 bar abs.).

A frequência de ocorrência de incêndios devido a grandes vazamentos, incluindo rupturas catastróficas, é da ordem de 3,0 E-05 a 6,0 E-07 por ano.

Há, basicamente, duas possibilidades de incêndio em poça, dentro e fora do dique, conforme descrito a seguir:

- Cenário 1: incêndio em poça confinado na área (31 m²) do dique de contenção devido à ruptura ou furo em tanque (10 m³) ou ruptura de tubulação (de 40 a 80 mm de diâmetro e pressão de 1,5 bar). O vazamento é imediato no primeiro caso e rápido no segundo (no máximo alguns minutos) e;
- Cenário 2: incêndio, em poça, não confinado ao Pátio de Estocagem por vazamento na tubulação de líquido de 40 mm de diâmetro com pressão de 3 bar abs, que é utilizada na transferência de metanol do caminhão-tanque para o tanque de estocagem .

O Cenário 2 (incêndio em poça) é o mais grave dentre os cenários analisado e, dependendo do ponto de vazamento, poderia causar danos a parte do Pátio de Estocagem (NH₃, GLP, H₂, e/ou CO₂), além da caldeira e parte do prédio da FEC-II, se não for combatido eficazmente. Assim, outros acidentes, envolvendo vazamentos de outras substâncias no Pátio de Estocagem, poderiam ocorrer por efeito dominó, assim como poderiam causar cerca de 1 a 100% de fatalidade num raio de 44 m do centro do incêndio. A distância segura é maior que 212 m.

◆ *Evento 19 - Acidentes de Criticalidade*

Conforme apresentado no item 5.3.2.2. anterior, embora improvável, é postulado pelo Regulatory Guide 3.34, que na Unidade de Produção de Pó ocorreria um acidente de criticalidade nuclear na autoclave ou no precipitador e na Unidade de Produção de Pastilhas ocorreria um acidente no homogeneizador ou na prensa. A magnitude do acidente, excursão com 1,0 E19 fissões, independente das características de projeto da instalação e da quantidade de material envolvida e fornece resultados superestimados de dose para trabalhadores e indivíduos do público.

Causas Postuladas do Acidente

Uma possível causa do acidente pode ser ordem natural, como inundação, terremoto, etc., causando uma perda de geometria dos equipamentos citados, fazendo com que o material físsil disponível se agrupe numa configuração supercrítica, o que provocaria o acidente de criticalidade. Outra possível causa é a ocorrência de uma falha técnica nos equipamentos ou nos Sistemas de Medição que envolve os sensores de umidade, de pH, etc. Uma falha deste tipo pode levar à inundação, ao alcance de uma condições de moderação ótima, sem nenhuma ação mitigadora ou de proteção e, portanto, provocar um acidente de criticalidade.

Nota-se que, para ocorrer tal acidente, é sempre necessário a concorrência de várias situações cujo projeto, atendendo ao princípio da dupla contingência, busca evitar.

Análise do Acidente

A análise detalhada do acidente hipotético de criticalidade na FEC-II encontra-se no “capítulo 9 -



Análise de Acidentes, do RAS – Relatório de Análise de Segurança” elaborado pela INB para o licenciamento nuclear do empreendimento pela CNEN, onde as considerações feitas e a metodologia de cálculo utilizada estão detalhadas.

No Regulatory Guide 3.34 é sugerido que, para as instalações que trabalham com soluções de U₂₃₅ numa sala ventilada, se considere um vaso com geometria insegura contra a criticalidade nuclear contendo uma solução de 400 g/l de urânio enriquecido. A excursão de potência postulada produz um primeiro pico de 1,0 E18 fissões em 0,5 s, seguido por 47 picos de 1,9 E17 fissões em intervalos de 10 minutos, totalizando 1,0 E19 fissões em 8 horas. A excursão termina com a evaporação de 100 litros de solução.

Para a Unidade de Produção de Pó, por se tratar de solução, deve-se considerar uma excursão de 1,0 E19 fissões enquanto que, para a Unidades de Produção de Pastilhas, considera-se uma excursão de 1,0 E18 fissões (Regulatory Guide 3.34), por se tratar de material sólido que não pode ser reagrupado naturalmente após o primeiro pulso. Para a análise de conseqüências do acidente de criticalidade foi considerado o evento mais restritivo na Unidades de Produção de Pó de UO₂, que envolve a liberação de 1,0 E19 fissões (“capítulo 9 – Análise de Acidentes, do RAS – Relatório de Análise de Segurança” elaborado pela INB para o licenciamento nuclear do empreendimento pela CNEN). A liberação do material radioativo é feita por meio de chaminé com 35 m de altura.

A distância mínima entre a cerca que delimita fisicamente a instalação e o local do acidente postulado é de 450 m. Para que esta área, interior à cerca, seja considerada de exclusão, ela deve pertencer à INB e, além dos seus limites, em 2 horas, um indivíduo não deve receber um dose na tireóide superior a 3 Sv e uma dose equivalente efetiva (corpo inteiro) superior a 0,25 Sv.

Os resultados mostram que a dose na tireóide, em duas horas de exposição, é de 4,5 E-04 mSv e, em duas horas de exposição um indivíduo na cerca recebe uma dose equivalente efetiva de 1,8 mSV. Entretanto, devido à chaminé, que diminui as doses nas proximidades das Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂, o pico de dose na tireóide ocorre além da cerca das Unidades. Ou seja, o pico de dose na tireóide ocorre a 2.000 m, com valor de 0,23 mSv, que é inferior ao limite de 3 Sv.

A área das Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂ atende aos critérios para acidente postulado e pode ser definida como área de exclusão. Próximo à área de exclusão, a dose equivalente efetiva é de 5,6 mSv na cerca, em 2 horas de exposição, sendo que, entretanto, não existe população nesse local. Desse modo, o risco de morte devido à câncer é considerado desprezível.

Na cidade de Itatiaia, cerca de 8 km do acidente de criticalidade, as conseqüências radiológicas são muito pequenas. A dose equivalente efetiva, em 8 horas de exposição, é de 5,9 E-02 mSv, o que permite esperar que ocorram 0,03 cânceres na população de 16.073 habitantes da cidade. Esta conseqüência é bem menor que as decorrentes de atividades típicas da cidade como construção, transporte, comércio, serviços e etc., que produzem de 3 a 40 mortes acidentais durante a vida e seus habitantes (“capítulo 9 – Análise de Acidentes, do RAS – Relatório de Análise de Segurança” elaborado pela INB para o licenciamento nuclear do empreendimento pela CNEN).

No centro de Resende, localizada a cerca de 19 km do acidente de criticalidade, as conseqüências radiológicas são ainda menores. A dose equivalente efetiva, em 8 horas de exposição, é de 1,07 E-02 mSv [30], o que permite esperar que ocorram 0,03 cânceres na população de 91.757 habitantes da cidade. Esta conseqüência é bem menor que as decorrentes de atividades típicas da cidade como construção, transporte, comércio, serviços e etc., que produzem de 22 a 210 mortes acidentais

durante a vida de seus habitantes (“capítulo 9 – Análise de Acidentes, do RAS – Relatório de Análise de Segurança” elaborado pela INB para o licenciamento nuclear do empreendimento pela CNEN).

Portanto, pode-se concluir que o acidente de criticalidade hipotético, com baixíssimas chances de ocorrer, não traria consequências significativas (mensuráveis) à população da região.

5.5.1.6 Conclusões

A análise dos resultados dos estudos de consequências dos eventos acidentais, leva a conclusão de que os seus efeitos físicos e radiológicos ficam restritos a um raio de 450 m, portanto dentro do sítio de propriedade da INB. Em nenhuma consequência dos eventos estudados as distâncias dos danos físicos ou radiológicos atingem qualquer comunidade próxima.

5.5.2 Análise de Vulnerabilidade

A vulnerabilidade dos operários, população e meio ambiente aos efeitos das consequências dos acidentes é apresentada a seguir com base em seus efeitos físicos e radiológicos.

5.5.2.1 Efeitos Físicos

A determinação dos efeitos físicos dos cenários acidentais é fruto de simulações com modelos matemáticos. Estas simulações fornecem como resultados a intensidade e o alcance das variáveis de exposição: radiação térmica, sobrepressão ou concentrações tóxicas, de acordo com a tipologia acidental.

Nestes cálculos serão considerados as diversas condições meteorológicas estatisticamente prováveis para a região, além das propriedades físico-químicas dos produtos envolvidos. A análise de vulnerabilidade avalia a extensão dos danos decorrentes dos acidentes simulados, estimando o número de vítimas, fatais ou não, entre trabalhadores e comunidade vizinha à instalação, além de danos às instalações e equipamentos.

Os danos acarretados por um acidente estão diretamente relacionados às suas consequências, ou seja, à área atingida e à intensidade da variável de exposição: radiação térmica em incêndios, sobrepressão, impacto e lançamento de projéteis em explosões ou concentração tóxica no vazamento de substâncias perigosas.

Efeitos sobre o Indivíduo

Estes danos são de natureza estocástica, isto é, somente se pode prever a probabilidade de se observar um certo dano a um indivíduo ou a percentagem esperada de pessoas da população exposta ao efeito físico que efetivamente sofrerão aquele dano. O modelo mais usado para esse tipo de estimativa é o Modelo de Vulnerabilidade de Eisenberg.

Este modelo para avaliação dos danos causados pelos acidentes tem como base o uso das funções do tipo Probit (“Probability Unit”), desenvolvido para a Guarda Costeira do Estados Unidos



(EISENBERG e LYNCH, C.J., 1975).

As equações de Probit que permitem relacionar a intensidade do efeito físico causador do dano com o efeito esperado são da forma:

$$Y = k_1 + k_2 \ln(V)$$

onde: Y = PROBIT, uma medida da percentagem do recurso vulnerável (pessoas, estruturas, etc) que é afetada no acidente;

V = uma função ou uma medida da intensidade do fator da causa dos danos aos recursos vulneráveis (sobrepessão, impulso e intensidade do fluxo térmico); e

k₁, k₂ e n - parâmetros específicos para cada tipo de dano e de substância.

Os coeficiente k₁ (parâmetro de localização) e k₂ (parâmetro de inclinação) são computados por estimativas de máxima verossimilhança a partir de dados empíricos (de forma semelhante aos coeficientes de equações de regressão clássicas). A variável Y, denominada probit ("probability unit"), é uma variável aleatória distribuída normalmente com valor médio 5 e variância 1. A percentagem do recurso vulnerável afetado corresponde à percentagem da distribuição cumulativa de Y, sendo esta relação definida pela equação:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

Esta correspondência matemática é mais fácil de ser usada na forma de uma tabela, conforme mostrado na Tabela 5.20 adiante, na qual as entradas principais são probits e as linhas e colunas fornecem as percentagens correspondentes.

Tabela 5.20 PROBABILITY UNITS

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33

As equações de probit serão utilizadas para os seguintes danos:

- ◆ **Exposição a nuvens tóxicas: morte por inalação**
- ◆ **Explosão**

- a) morte por sobrepessão devido a hemorragia no pulmão
- b) ruptura do tímpano

♦ **Radiação térmica: morte por queimadura**

Vulnerabilidade devido a Substâncias Tóxicas

A equação de probit para morte por exposição a nuvem de gás tóxico tem a forma,

$$Y = -k_1 + k_2 \ln (C^n t)$$

onde,

k_1 , k_2 e n = parâmetros dependentes da substância tóxica, [adimensional]

C = concentração de material tóxico na nuvem, [ppm]

t = tempo de exposição, [min.]

Na Tabela 5.21. a seguir, são apresentados os valores de referência relativos aos efeitos nocivos do HF para seres humanos (CNEN, 1984).

Tabela 5.21 VALORES DE REFERÊNCIA DE EFEITOS NOCIVOS DO HF

Concentração mg/m ³	Efeitos
0,1	Odor perceptível
2,5	Máximo admissível para exposição de 8 h/dia
25	Tolerável durante vários minutos.
40	Possibilidade de ser letal
100	Concentração máxima tolerável para exposição de 1 minuto

Na Tabela 5.22 são apresentados os efeitos em seres humanos devido à incorporações de U solúvel (NUREG -1140).

Tabela 5.22 VALORES DE REFERÊNCIA DE EFEITOS NOCIVOS DO URÂNIO

Incorporação mg	Efeitos
243,0	50% fatalidade
45	Danos Permanentes
8,6	Danos Renais
4,5	Nenhum Efeito

Vulnerabilidade devido a explosões

A equação de probit para morte por hemorragia no pulmão devido aos efeitos de explosões é:

$$Y = -77 + 6,91 \ln \Delta P$$

onde:

$$\Delta P = \text{sobrepressão, [N/m}^2\text{]}$$

e para ruptura de tímpano:

$$Y = -15,6 + 1,93 \ln \Delta P$$

◆ **Efeito sobre as pessoas**

Estas expressões permitem estabelecer aproximadamente, os seguintes valores de sobrepressão correspondentes aos efeitos relacionados na Tabela 5.23 abaixo.

Tabela 5.23 NÍVEIS DE SOBREPRESSÃO E EFEITO ESPERADO

EFEITO	PERCENTAGEM	ΔP (N/m ²)	ΔP (psi)
Ruptura de tímpano	1	16550	2,4
Ruptura de tímpano	90	84129	12,2
Fatalidade	1	106866	15,5
Fatalidade	99	199980	29,0

Nos casos de explosão, as zonas potencialmente sujeitas a cada um destes quatro níveis de sobrepressão serão determinadas. Estas zonas serão definidas por círculos concêntricos a partir do centro da explosão até o ponto onde a sobrepressão esperada corresponder a cada um dos níveis definidos na Tabela acima.

◆ **Efeitos sobre Equipamentos e Estruturas**

Vulnerabilidade devido a incêndio

A equação de probit para morte por queimadura decorrente tanto de incêndio em poça como de bola de fogo é dada por:

$$Y = - 14,9 + 2,56 \ln (t I^{4/3} 1,0 E-04)$$

onde:

t = tempo de exposição à radiação térmica, [S]

I = intensidade de radiação térmica, W/m²

Nos casos de incêndio de líquido inflamável a área de risco ou área vulnerável deverá ser delimitada por um círculo a partir do centro da poça para os níveis de fluxo térmico definidos na Tabela 5.24 abaixo.

Tabela 5.24 NÍVEIS DE FLUXO DE RADIAÇÃO TÉRMICA E EFEITO ESPERADO

EFEITO	FLUXO TÉRMICO (kW/m ²)
<ul style="list-style-type: none"> • 100% de letalidade em um minuto de exposição • 1% de letalidade em 10 segundos de exposição 	37,5
<ul style="list-style-type: none"> • 100% de letalidade em um minuto de exposição • lesões significativas em 10 Segundos de exposição 	25,0
<ul style="list-style-type: none"> • 1% de letalidade em um minuto de exposição • queimaduras de primeiro grau em 10 segundos de exposição 	12,5

Ou em função do tempo de exposição, conforme a Tabela 5.25 a seguir:

Tabela 5.25 VALORES DE TEMPO DE EXPOSIÇÃO RELACIONADOS AOS NÍVEIS E FATALIDADE ESTABELECIDOS

FLUXO DE CALOR (kW/m ²)	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (s)		
	% FATALIDADE		
	1%	50%	99%
1,6	500	1.300	3.200
4,0	150	370	930
12,5	30	80	200
37,5	8	20	50

5.5.2.2 Efeitos Radiológicos

Os efeitos radiológicos dos eventos acidentais serão avaliados à luz das Tabelas 5.26 e 5.27 apresentadas a seguir, com base no ICRP – International Commission on Radiological Protection, Efeitos Determinísticos Probabilísticos da Radiação e seus Limiares.

Tabela 5.26 EFEITOS DETERMINÍSTICOS DA RADIAÇÃO E SEUS LIMIARES

ÓRGÃO	EFEITO LIMAR PARA EXPOSIÇÃO AGUDA (Sv)
TESTÍCULOS	
Esterilidade Temporária	0,15
Esterilidade Permanente	3,5 - 6,0
OVÁRIOS	
Esterilidade	2,5 - 6,0
CRISTALINO	
Opacificação	0,5 - 2,0
Cegueira	5,0
MEDULA	
Depressão da Hematoprese	0,5

Fonte: ICRP, PT 60

Tabela 5.27 COEFICIENTES NOMINAIS DE PROBABILIDADE		
PROBABILIDADE DE CÂNCER FATAL		
ÓRGÃO OU TECIDO	PÚBLICO (1,0 E-02/Sv)	TRABALHADORES (1,0 E-02/Sv)
Bexiga	0,30	0,24
Medula	0,50	0,40
Ossos	0,05	0,04
Seios	0,20	0,16
Cólon	0,85	0,68
Fígado	0,15	0,12
Pulmão	0,85	0,68
Esôfago	0,30	0,24
Ovário	0,10	0,08
Pele	0,02	0,02
Estômago	1,10	0,88
Tireóide	0,08	0,06
Restante	0,50	0,40
TOTAL	5,0	4,0

Fonte: ICRP, PT 60

5.5.2.3 Exposição de Pessoal

Com base nas conclusões do estudo de consequência dos eventos, conclue-se que o número de pessoas expostas aos eventos acidentais, limitado ao maior raio de exposição, fica restrito a todo o pessoal da Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂, assim como os operadores do Pátio de Estocagem., Utilidades e Portaria da FEC II, totalizando cerca de 100 pessoas

Assim sendo é previsto a seguinte alocação de pessoal nas áreas físicas:

- Prédio da FEC II = 86
- Número de Operador/Proteção Radiológica por Seção de Processo: 2 (máximo)
- Pessoal da Portaria da FEC II e Operação Externa : número máximo estimado: 4
- Pessoal máximo em trânsito na parte exterior ao Prédio de Processo : 10 (conservador)

A vulnerabilidade dos trabalhadores, público e das instalações da INB frente as consequências dos acidentes avaliados e aos parâmetros apresentados anteriormente, está sumarizada na Tabela 5.28 adiante para cada evento estudado. Para uma visualização da área de vulnerabilidade decorrente dos eventos, é apresentado no Mapa 001, os raios de fatalidade para os eventos externos.

Tabela 5.28 VULNERABILIDADE – RESUMO

Evento	Descrição	Frequência /ano	Consequências		Vulnerabilidade
			Físicas	Radiológicas	Fatalidades
1	Ruptura hidrostática de cilindro com sobreenchimento de UF ₆ durante o aquecimento na autoclave – acidente postulado WASH 1284 -	< 1,0 E-07	a)Conc. de HF (mg/m ³) 100 m=1,83 200 m= 0,29 b) estilhaços dos vasos	a)Conc. U (Bq/m ³) 100 m= 14,5 200 m= 9,8 b)Dep. U (Bq/m ²) 100 m = 1.020 200 m = 0 Dose total = 0,119 mSv/ano	a) Operador= 0 Público= 0 b) Operador= 2 Público =0
2	Ruptura de cilindro de UF ₆ devido ao superaquecimento com vazamento de UF ₆ no interior da autoclave – acidente postulado WASH 1284	< 1,0 E-07	Menor que no evento 1.	Menor que no evento 1	a) Operador= 0 Público= 0
3	Rompimento de tubulação da linha de alimentação de UF ₆	8,3 E-04	Conc. de HF (mg/m ³)=706,6	Inalação = 16 mg de U – Operdor= < 1,2 mSv ou 1,2 E-03 Sv	Operador= 0 Público= 0
4	Incêndio de metanol nos filtros rotativos	5,3 E-04	Incêndio de 0,3 m ³ de metanol em 12 s	Menor que no evento 1. Dose total < 0,119 mSv/ano	Operador= 0 Público =0

Tabela 5.28 VULNERABILIDADE – RESUMO

Evento	Descrição	Frequência /ano	Consequências		Continuação
			Físicas	Radiológicas	Vulnerabilidade
					Fatalidades
5	Explosão de hidrogênio no forno de sinterização de pastilhas – acidente postulado	5,3 E-04	Explosão de 71 g de H ₂ Raio de fatalidade = 10 m	a) Conc. U (Bq/m ³) 100 m= 16,4 200 m= 2,6 b) Dep. U (Bq/m ²) 100 m = 331 200 m= 0 Dose total < 0,135 mSv/ano	Operador= 2 Público =0
6	Explosão de hidrogênio no forno de leite fluidizado	5,3 E-04	Explosão de 14 g de H ₂ Raio de fatalidade = 4 m	Menor que no evento 1	Operador= 2 Público =0
7	Explosão de hidrogênio em lavador de gases	5,3 E-04	Explosão de 14 g de H ₂ Raio de fatalidade = 4 m	desprezível	Operador= 2 Público =0
8	Explosão de nitrato de amônio em lavador-aspersor de gases	1,6 E-05	Explosão de 5,6 kg de Nitrato Raio de fatalidade = 5 m	desprezível	Operador= 2 Público =0
9	Explosão / incêndio de pó de UO ₂ no vaso de passivação	5,3 E-04	Explosão de pó Raio de fatalidade < 0,5 m	Liberação máxima de 64 g de U na faixa respirável. Dose total < 0,135 mSv/ano	Operador=0 Público =0

10	Explosão em nuvem de GLP no prédio	< 1,0 E-07 acidente não crível	-	-	Operador=0 Público =0
----	------------------------------------	--	---	---	--------------------------

Tabela 5.28 VULNERABILIDADE – RESUMO

Evento	Descrição	Frequência /ano	Consequências		Vulnerabilidade
			Físicas	Radiológicas	Fatalidades
			<i>Continuação</i>		
11	Explosão em nuvem não confinada de amônia externamente (UVCE)	< 1,0 E-06	Vazamento de tanque de 9 t Raio de fatalidade = 108 m	Não aplicável	Operador =14 Público =0
12	Explosão em nuvem não confinada de GLP externamente	5,0 E-07	Ruptura tanque de 10 t Raio de fatalidade = 171 m	Não aplicável	Operador =14 Público =0
13	Vazamento tóxico externo de amônia	1,10 E-05	Vazamento tóxico Raio de fatalidade = 50 m	Não aplicável	Operador = 2 Público =0
14	Vazamento tóxico externo de GLP	5,5 E-06	Dose letal = 100.000 ppm (20s) Raio de fatalidade = 15 m	Não aplicável	Operador = 2 Público =0
15	Incêndio externo de amônia e BLEVE (Explosão de vapor de líquido em ebulição)	5,5 E-06	Tanque com 9 t de amônia Raio de fatalidade = 58 m	Não aplicável	Operador = 4 Público =0

16	Incêndio externo de GLP e BLEVE	2,5 E-06	Tanque com 10 t de GLP Raio de fatalidade (100%) = 97 m (< 100%) = 450 m	Não aplicável	Operador =14 Público =0
17	Incêndio externo de hidrogênio	6,0 E-06	Incêndio em jato Raio de fatalidade = 39 m	Não aplicável	Operador =2 Público =0
18	Incêndio externo de metanol	1,5 E-05	Raio de fatalidade = 44 m	Não aplicável	Operador =2 Público =0

Tabela 5.28 VULNERABILIDADE – RESUMO

<i>Continuação</i>					
Evento	Descrição	Frequência /ano	Consequências		Vulnerabilidade
			Físicas	Radiológicas	Fatalidades
19	Acidentes de Criticalidade – acidente postulado – WASH 1284	< 1,0 E-07	Não aplicável	Solução de 400 g/l de urânio. Pico de 1,0 E18 fissões em 0,5 s , seguido por 47 picos de 1,9 E17 fissões em intervalos de 10 minutos, totalizando 8 horas e evaporando 100 l de solução. Dose na tireóide/2 horas = 4,5 E-04 mSv e dose total = 1,8 mSv	Operador =0 Público =0

5.5.2.4 Avaliação de Riscos

As ferramentas frequentemente utilizadas para a avaliação dos riscos de uma planta industrial são o Risco Individual e o Risco Social.

O Risco Individual pode ser quantificado com o quociente da divisão do produto da frequência de ocorrência do acidente e a magnitude dos seus danos, expressa em fatalidades por evento, pelo número de pessoas expostas, oferecendo medida da probabilidade de que uma pessoa do grupo exposto sofra a consequência fatal.

O Risco Social, que mede os riscos de exposição da população ao acidente, tem seus resultados registrados num gráfico F-N, frequência acumulada de ocorrências acidentais por número de fatalidades.

Para se colocar em perspectiva os resultados quantitativos obtidos neste capítulo, na Tabela 5.29 são apresentados alguns valores de riscos sociais e individuais no Brasil e no exterior relativos à várias atividades industriais e não industriais. A apresentação destes dados se faz necessária para o perfeito entendimento dos perigos aos quais trabalhadores e população estão expostos, em decorrência da presença do empreendimento em questão.

5.5.2.5 Riscos Individuais

O risco de um dado evento é expresso quantitativamente como o produto da frequência de ocorrência do evento pelas suas consequências, ou seja:

Risco (*fatalidades/ano*) = Frequência (*eventos/ano*) x Consequências (*fatalidades/evento*)

A frequência refere-se a um certo intervalo de tempo, o qual é normalmente tomado como um ano, de modo que o risco é obtido em uma base anual. Em se tratando de risco de acidentes, a consequência mais importante é a fatalidade de seres humanos, embora ocorram outros tipos de consequências (ferimentos, destruição de residências, etc.).

Para uma instalação industrial qualquer, onde possam ocorrer diversas hipóteses acidentais, podemos generalizar a equação acima, escrevendo:

$$r = \frac{1}{N} \sum x_i f_i$$

onde r é o risco individual da instalação (tradicionalmente, expressa em mortes por ano), f_i e x_i representam, respectivamente, a frequência anual de um dado acidente e o número de mortes resultantes do mesmo; N é o número total de pessoas expostas ao risco, calculado com base na

maior área atingida por um acidente. O somatório é feito sobre o número de hipóteses acidentais num dado local.

5.5.2.6 Riscos Sociais

Os Riscos Sociais estão diretamente relacionados ao número de pessoas expostas às conseqüências de uma ocorrência acidental. Normalmente o Risco Social é representado através de gráficos F-N, onde as conseqüências, medidas em termos de número de fatalidades, são alocadas em função da freqüência acumulada de acidentes.

5.5.2.7 Apresentação dos Resultados

A partir das freqüências determinadas e dos danos calculados nas análises de consequência e de vulnerabilidade, foram obtidos os valores dos riscos sociais para cada evento acidental com fatalidades, conforme apresentado na Tabela 5.29 abaixo.

Tabela 5.29 ANÁLISE DE RISCOS - QUADRO RESUMO

EVENTO	DESCRIÇÃO	FREQÜÊNCIA/ ano	VULNERABILIDADE fatalidade/evento	RISCOS
1	Ruptura hidrostática de cilindro com sobreenchimento de UF ₆ durante o aquecimento na autoclave – acidente postulado WASH 1284 -	< 1,0 E-07	2	< 2,0 E-07
5	Explosão de hidrogênio no forno de sinterização de pastilhas – acidente postulado	5,3 E-04	2	1,06 E-03
6	Explosão de hidrogênio no forno de leito fluidizado	5,3 E-04	2	1,06 E-03
7	Explosão de hidrogênio em lavador de gases	5,3 E-04	2	1,06 E-03
8	Explosão de nitrato de amônio em lavador-aspersor de gases	1,6 E-05	2	3,2 E-05
11	Explosão em nuvem não confinada de amônia externamente, RF=108 m	< 1,0 E-06	14	< 1,4 E-05

Tabela 5.29 ANÁLISE DE RISCOS - QUADRO RESUMO

Continuação

EVENTO	DESCRIÇÃO	FREQÜÊNCIA/ ano	VULNERABILIDADE fatalidade/evento	RISCOS
12	Explosão em nuvem não confinada de GLP externamente, RF = 171 m	5,0 E-07	14	< 7,0 E-05
13	Vazamento tóxico externo de amônia, RF= 50 m	1,10 E-05	2	2,2 E-05
14	Vazamento tóxico externo de GLP, RF=15 m	5,5 E-06	2	1,1 E-05
15	Incêndio externo de amônia e BLEVE, RF=58 m	5,5 E-06	4	2,2 E-05
16	Incêndio externo de GLP e BLEVE, RF= 450 m	2,5 E-06	14	3,5 E-05
17	Incêndio externo de hidrogênio, RF= 39 m	6,0 E-06	2	1,2 E-05
18	Incêndio externo de metanol, RF= 44 m	1,5 E-05	2	3,0 E-05

Risco Individual

O Risco Individual calculado para os empregados da INB/FEC II é de 3,4 E-05 fatalidades/ano, risco esse, como veremos adiante, menor do que a maioria dos riscos individuais que um indivíduo no Brasil está exposto.

Quanto ao risco ocupacional, um índice conveniente utilizado é o da Taxa de Acidentes Fatais ou TAF, em inglês "Fatal Accident Rate ou FAR, definido como o número de fatalidades ocupacionais em 1,0 E08 (100 milhões) de horas de trabalho. Este índice é calculado como:

$$\text{TAF} = \frac{\text{Risco Individual} \times 1,0 \text{ E}08}{8760}$$

Assim, a TAF calculada para a Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂, de 0,388, é menor que as das indústrias automobilística e química do parque britânico, conforme a Tabela 5.30 a seguir.

Tabela 5.30 VALORES MÉDIOS DE TAF DA INDÚSTRIA BRITÂNICA

Vestuários e Calçados	0,15
Automobilística	1,3
Indústria Química	3,5
Indústria de Aço	8
Indústria Agrícola	10
Mineração do Carvão	40
Construção Civil	67
Tripulação de Aviões	250

Lees, F. P. Loss Prevention in the Process Industries (1980)

Risco Social

O Brasil não possui um critério de aceitabilidade de riscos para o público e funcionários, utilizando-se como referência os padrões internacionais. No presente estudo, utiliza-se, na figura 5.3, o padrão de aceitabilidade da agência de meio ambiente da Dinamarca (1989), considerado bastante rigoroso, para referenciar os eventos analisados. Na figura 5.4, apresentamos a curva de risco social do empreendimento. Conclui-se que os riscos sociais em tela encontram-se dentro da faixa de risco aceitável e de risco tolerável.

Figura 5.3

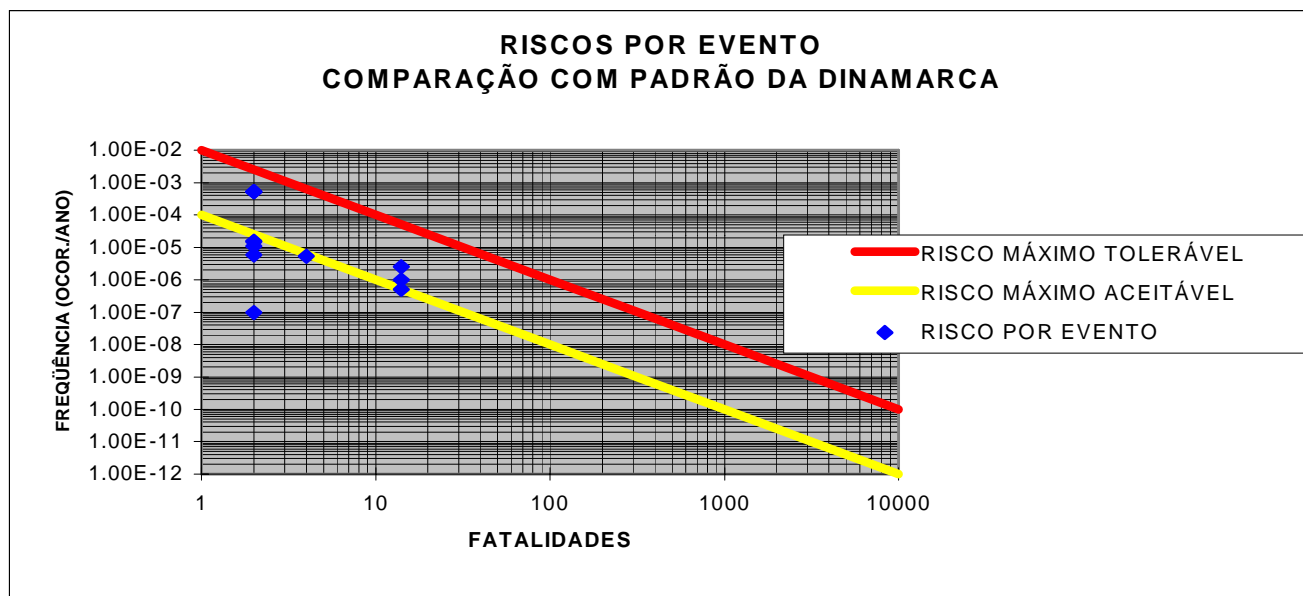
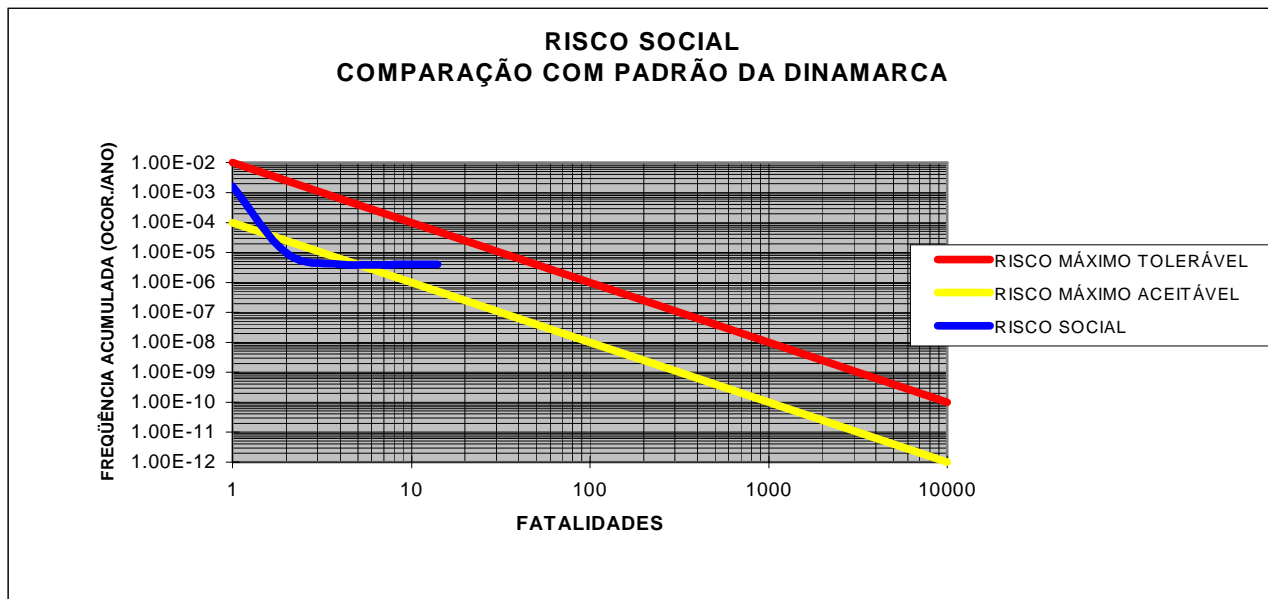


Figura 5.4



5.5.2.8 Conclusões

Os resultados da Análise de Riscos demonstram que o público em geral ou as comunidades residentes no entorno da Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂ não correm riscos de ferimentos ou fatalidades, seja por efeito físico ou radiológico, decorrentes de qualquer evento acidental, mesmo no caso de acidentes com freqüência classificada como remota ou extremamente remota (Tabela 5.9) pelos organismos internacionais.

Quanto aos empregados, o risco individual de fatalidade por danos físicos e químicos a que estão expostos, calculado em 3,3 E-05 fatalidades/ano, quando comparado com os riscos individuais de fatalidade no Brasil, Tabela 5.31 adiante, evidencia que sua situação de risco ocupacional é comparável ou menor do que os riscos de dirigir automóveis, morrer atropelado, etc...

Tabela 5.31 RISCOS INDIVIDUAIS NO BRASIL

CAUSAS	RISCO INDIVIDUAL (fatalidades/ano)
ATROPELAMENTO	7,3 E-5
DIRIGIR CARRO	5,2 E-4
DESCARGA ATMOSFÉRICA	4,5 E-6
INCÊNDIO	2,8 E-6
LEUCEMIA	2,3 E-5
AFOGAMENTO	5,0 E-5
ELETROCUSSÃO	7,2 E-6

Fonte: FIBGE, elaboração Natrontec

Quanto aos danos radiológicos, os resultados obtidos mostram que as doses recebidas pelos empregados, como consequência dos eventos acidentais postulados, 0,119 mSv (ruptura do cilindro de UF₆), 0,135 mSv (explosão do forno de sinterização) ou 1,8 mSv (acidente de criticalidade) encontram-se muito abaixo do limite de dose efetiva máxima estabelecido pela CNEN (Norma 3.01) para exposição ocupacional (50 mSv/ano).

Os valores das doses por outro lado, quando comparados com os dados da Tabela 5.26 anterior - ICRP (International Commission on Radiological Protection, PT 60, Efeitos Determinísticos da Radiação e seus Limites) - , permitem afirmar que, mesmo nas piores hipóteses de acidentes, as doses máximas resultantes seriam cerca de 1.000 vezes menores do que os valores associados a danos permanentes.

Assim, concluímos que os riscos de fatalidades e de efeitos radiológicos, com danos à saúde e à vida, decorrentes de acidentes nas Unidades de Produção de Pó e Pastilhas de UO₂, e são limitados à propriedade da INB, não atingindo comunidades ou instalações vizinhas, e estão dentro dos critérios de aceitabilidade e tolerabilidade internacional de riscos sociais.

Internamente os riscos para os trabalhadores são menores, ou no máximo iguais aos riscos de fatalidades que os indivíduos estão normalmente expostos em uma sociedade industrial. Adicionalmente os riscos ocupacionais de fatalidades são cerca de 10 vezes menores que os da indústria química e 4 vezes menores que os da indústria automobilística britânica.