

## **EFEITO DOMINÓ EM UNIDADES QUÍMICAS DE CENTROS NUCLEARES**

**Jean-Claude Bozzolan**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN – SP)  
Av. Professor Lineu Prestes 2242  
05508-000 São Paulo, SP  
jcbozzol@ipen.br

### **ABSTRACT**

As plantas químicas que fazem parte do chamado ciclo do combustível nuclear apresentam a possibilidade de ocorrência de acidentes com danos graves, despertando preocupações por parte dos responsáveis pela segurança nos órgãos governamentais e nos centros nucleares. A avaliação e o gerenciamento dos riscos dos processos envolvidos nestas unidades fazem parte do panorama atual da indústria nuclear através da elaboração de Análises de Riscos para atender exigências da legislação em vigor, evitar e minimizar perdas materiais ou humanas dentro, mas também próximo a essas instalações. Entretanto a maior parte das Análises de Riscos elaboradas para tais finalidades não inclui no estudo as avaliações qualitativas, quantitativas e probabilísticas de cadeias de acidentes em que incêndios, explosões, fragmentos e núveis tóxicas em uma unidade da instalação causam acidentes graves secundários em outras unidades ou mesmo em unidades de instalações vizinhas à planta em questão. Tal propagação de acidentes é mais conhecida por “*Efeito Dominó*”. O presente trabalho apresenta um resumo dos métodos para a avaliação do efeito dominó nas Análises de Riscos podendo contribuir para a consideração de efeitos secundários acidentais significativos nas análises, inclusive para quaisquer tipos de instalações químicas industriais. Uma avaliação do risco de ocorrência do efeito dominó inclui, dado o ocorrido de um acidente primário, a identificação dos acidentes secundários, suas probabilidades e suas conseqüências.

### **1. INTRODUÇÃO**

Embora seja importante considerar as conseqüências do Efeito Dominó em uma análise integrada de acidentes, verifica-se que, mesmo os textos mais elaborados sobre acidentes em instalações do ciclo do combustível nuclear, não exploram esse assunto em profundidade.

O objetivo do texto proposto é o de mostrar como estudar a possibilidade de ocorrência do Efeito Dominó em instalações químicas do ciclo do combustível nuclear e como avaliar a suas conseqüências. Estudam apontam que a etapa mais crítica na avaliação quantitativa desses efeitos é a disponibilidade de modelos confiáveis para estimar a possibilidade e probabilidade de escalação de acidentes primários. Esse trabalho apresenta uma revisão dos modelos disponíveis para atingir tais objetivos.

### **2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES**

#### **2.1. Definições do Efeito Dominó**

Para consolidar o objetivo desse trabalho são apresentadas algumas definições de “efeito dominó” selecionadas dentre importantes autores estudiosos do assunto.

**Bagster, D.F., Pitblado, R.M., 1991.** *The estimation of domino incident frequencies – an approach. Process Safety Environment 69B, 196.*

“Perda de contaminante de um item de uma planta, resultante de um acidente sério nesta planta ou em unidades próximas”.

**Lees, F.P., 1996.** *Loss Prevention in process industries (2<sup>nd</sup> edition). Butterworths, 1-3, London.*

“Risco que pode ocorrer se o vazamento de um material perigoso conduzir a uma propagação de acidente”.

**Delvosalle, C., 1996** *Domino effects phenomena: definition, overview and classification. First European Symp. On Domino Effects, Leuven, Belgium. September, 1996.*

“Conjunto de eventos relacionados em que as conseqüências de um acidente prévio vêm aumentando no espaço e no tempo gerando um acidente grave.”

**Khan, F.I., Abbasi, S.A. 1998.** *Models for Domino Effect Analysis in Chemical Process Industries. Process Safety Progress Summer 1998.*

“Cadeia de acidentes ou situações em que incêndios, explosões, mísseis ou cargas tóxicas geradas por um acidente em uma unidade industrial, causa um grande acidente secundário em outras unidades”.

A partir dessas definições se pode concluir que o efeito dominó implica a existência de um acidente “primário”, eventualmente sem gravidade, afetando uma instalação “primária”, más induzindo um ou mais acidentes “secundários” que afetarão uma ou mais instalações “secundárias”. Estes acidentes “secundários” devem ser mais graves e devem ampliar os danos do acidente primário.

## **2.2. Tipos de Efeito Dominó**

A análise de acidentes passados em plantas químicas permite classificar o efeito dominó conforme:

- o tipo de instalações primárias e secundárias afetadas;
- a natureza dos efeitos físicos primários e secundários ocorridos.

### **2.2.1. Tipos de instalações**

Foram identificados 5 tipos principais de instalações mais afetadas pelo efeito dominó. Segue na Tab. 1, a frequência relativa de ocorrências de acidentes primários e secundários para estes tipos de instalações.

**Tabela 1. Frequências relativas de ocorrência de efeito dominó para varios tipos de instalações primárias e secundárias**

	<b>Instalações primárias</b>	<b>Instalações secundárias</b>
<b>Tanques de estocagem pressurizados</b>	30%	33%
<b>Tanques de estocagem atmosféricos ou criogênicos</b>	28%	46%
<b>Equipamentos de processo</b>	30%	12%
<b>Redes de tubulação</b>	12%	-
<b>Outros</b>	-	9%

### 2.2.2. Natureza dos efeitos primários e secundários

Os principais efeitos que podem degenerar em acidentes primários e secundários associados a este tipo de fenômenos e instalações são apresentados na Tab. 2.

**Tabela 2. Natureza dos efeitos físicos em acidentes graves com efeito dominó**

<b>Acidente Primário</b>		<b>Acidente Secundário</b>	
<b>Efeito</b>	<b>Ocorrência relativa do fenômeno físico</b>	<b>Efeito</b>	<b>Ocorrência relativa do fenômeno físico</b>
<b>Mecânico (35%)</b>	Mísseis (53%) VCE (47%)	<b>Mecânico (37%)</b>	VCE (59%) Mísseis (50%)
<b>Térmicos (77%)</b>	BLEVE (31%) Incêndio de poça (24%) Superaquecimento (12%) Incêndio “flash” (14%) Jato de fogo (10%) Outros incêndios (9%)	<b>Térmicos (93%)</b>	BLEVE (25%) Incêndio de poça (17%) Superaquecimento (13%) Outros incêndios (44%) Jato de fogo (-) Incêndio flash (-)
		<b>Tóxicos (10%)</b>	

É importante notar que um acidente pode provocar mais de um efeito secundário.

## **2.3 Mecanismos do Efeito Dominó**

### **2.3.1. Eventos iniciadores do efeito dominó**

Os eventos seguintes podem desencadear o efeito dominó:

- a) incêndios
- b) explosões
  - b.1 ondas de choque
  - b.2 mísseis
- c) liberação tóxica
- d) impactos devidos a incêndios e explosões simultâneos e interativos.

### **2.3.2. Incêndio como evento iniciador**

**Incêndio: é o resultado de uma oxidação descontrolada de produtos químicos em presença de ar com liberação de calor.**

Um incêndio numa unidade gera uma carga de calor que pode ter energia suficiente para superar a resistência do material de construção das unidades mais próximas e/ou aumentar as suas pressões internas devido ao aquecimento ou ebulição dos produtos químicos nelas contidas.

Incêndios estão entre os acidentes de maior ocorrência em indústrias químicas, podendo ocorrer, conforme a literatura, cerca de um incêndio pequeno por ano nestas plantas.

A Fig.1 apresentada por *Khan, F.I., Abbasi, S.A. 1998* [5] ilustra o efeito dominó iniciado por um incêndio.

### **2.3.3. Explosão como evento iniciador**

**Explosão: é o resultado de liberação súbita de energia**

A energia liberada por uma explosão pode ser de origem química ou física conforme se trata de uma combustão de um gás inflamável, do descontrolo de uma reação química em processamento ou da ruptura de um vaso devido a altas pressões ou defeitos estruturais. As ondas de choque produzidas e os mísseis gerados por uma explosão podem atingir outros equipamentos de processo da unidade ou outras instalações provocando o chamado "efeito dominó".

A Fig. 2 apresentada por *Khan, F.I., Abbasi, S.A. 1998* [5] ilustra o efeito dominó iniciado por uma explosão.

### **2.3.4. Liberação tóxica como evento iniciador**

A exposição a um produto tóxico liberado por um acidente pode provocar nos operadores da planta condições de pânico causando incapacidade na execução de manobras ou a execução de manobras erradas que podem levar ao descontrolo no funcionamento da planta e conseqüentemente a novos acidentes.

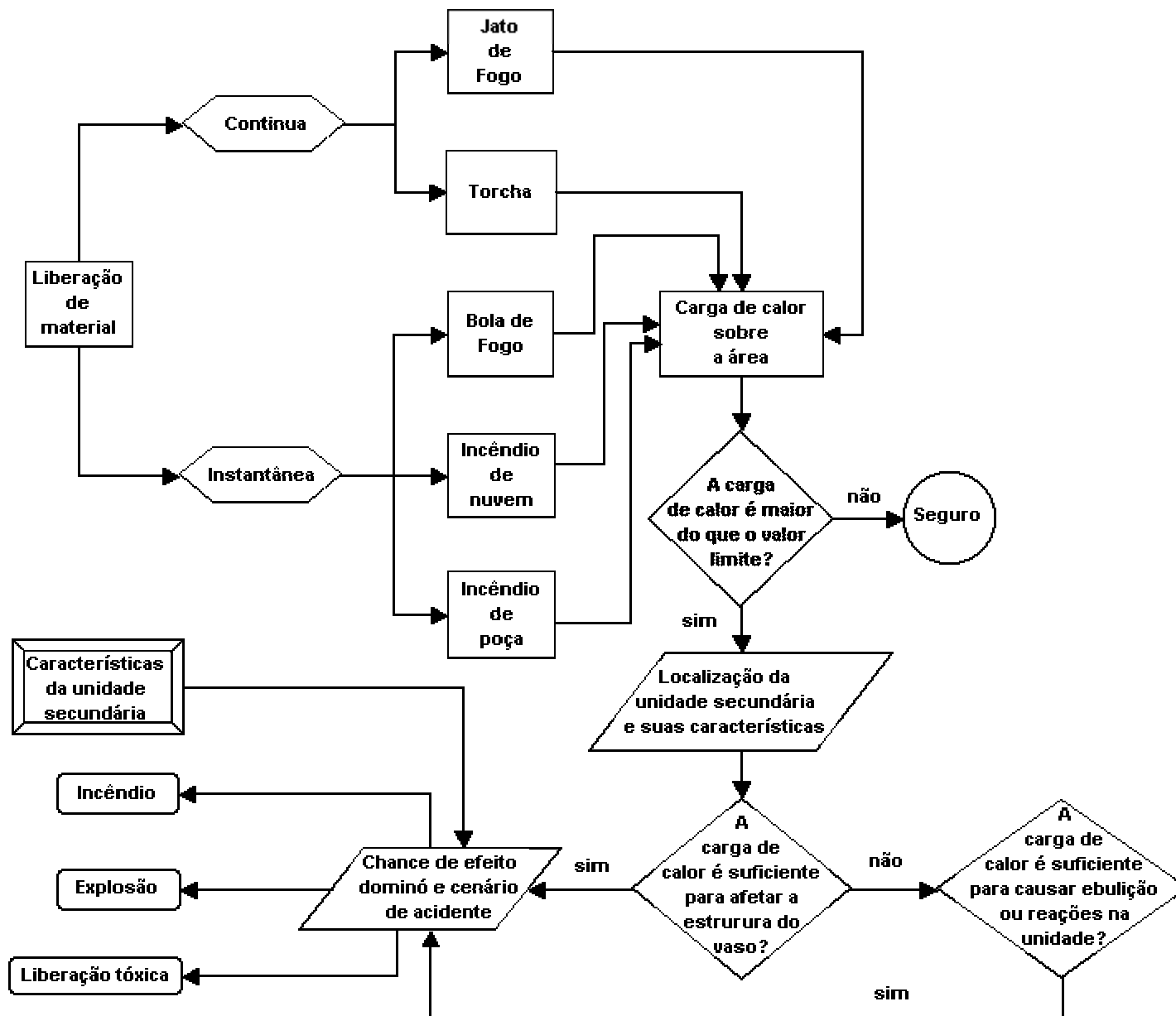


Figura 1. Análise de efeito dominó desencadeado por um incêndio

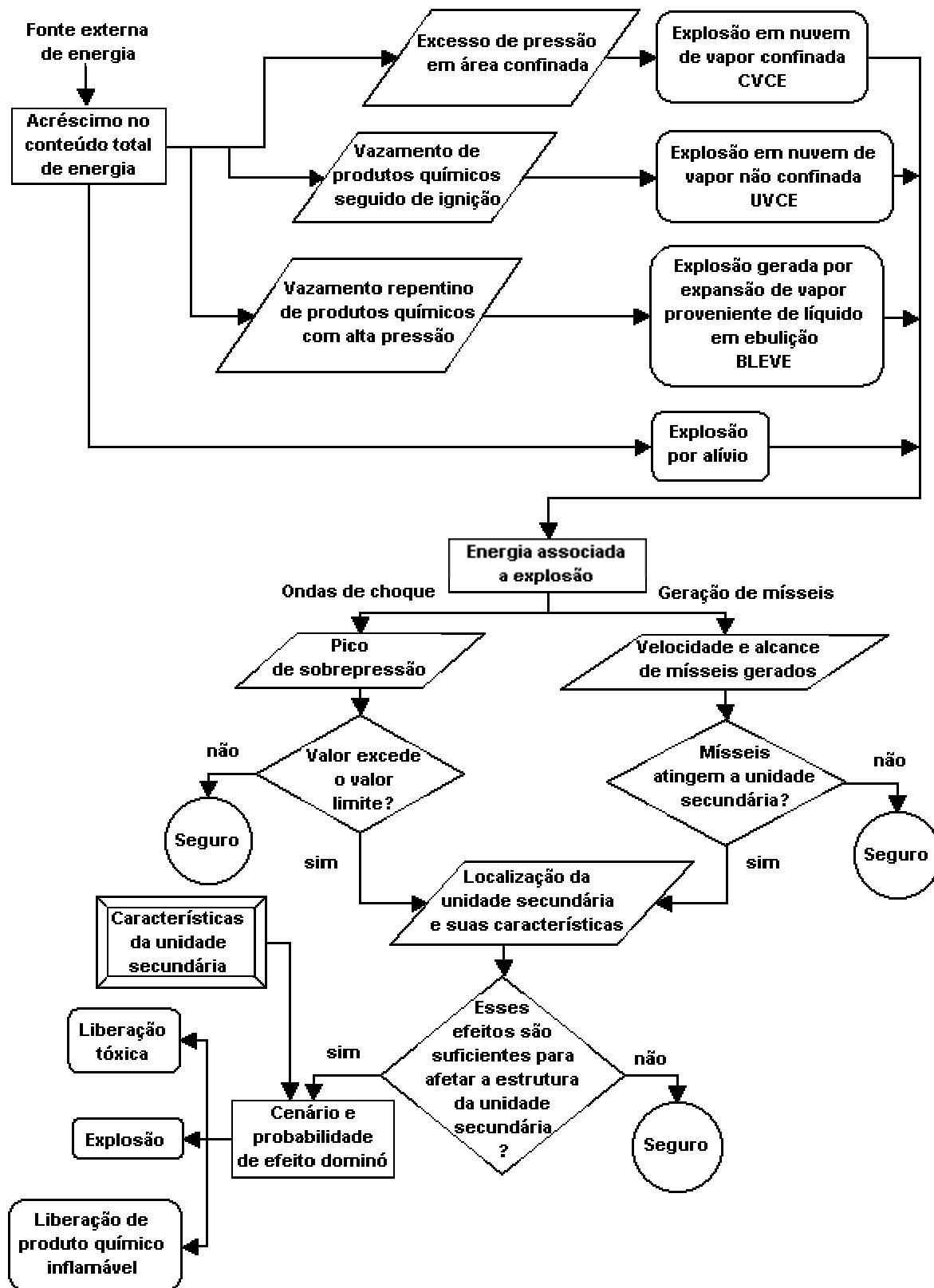


Figura 2. Análise de efeito dominó desencadeado por uma explosão

### **3. INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS QUÍMICAS DO CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR**

#### **3.1. Introdução**

O ciclo do combustível nuclear consiste numa ampla variedade de instalações que inclui:

- ⇒ a mineração e moagem
- ⇒ a conversão
- ⇒ o enriquecimento
- ⇒ a fabricação do combustível (inclusive o combustível de óxido misto)
- ⇒ o reator
- ⇒ a estocagem provisória de combustível queimado
- ⇒ o reprocessamento
- ⇒ a vitrificação e disposição final dos rejeitos.

São consideradas “instalações químicas do ciclo do combustível nuclear” todas as instalações do ciclo exceto as usinas nucleares de potência e reatores de pesquisa. O transporte, a armazenagem provisória e o tratamento final dos rejeitos também não fazem parte desses tipos de classificação de instalações.

#### **3.2 Perigos químicos**

As instalações do ciclo do combustível nuclear apresentam perigos aos equipamentos, trabalhadores e ao público em geral na forma de liberações químicas tóxicas, corrosivas e combustíveis. Tirando as preocupações com radioatividade e criticabilidade, as instalações do ciclo podem ser consideradas como plantas químicas convencionais onde grandes quantidades de produtos químicos tóxicos, corrosivos e combustíveis são manipulados, processados e estocados. Entre os produtos químicos encontrados nessas instalações constam em quantidades industriais significativas os ácidos fluorídrico, nítrico, sulfúrico e fosfórico, a amônia, a hidrazina, o hexafluoreto de urânio entre outros.

#### **3.3 Incêndios e explosões**

Muitas instalações do ciclo utilizam materiais inflamáveis e explosivos em seus processos tais como a mistura tributil-fosfato/querosene para extração em colunas de absorção, betume para o condicionamento dos rejeitos radioativos, hidrogênio para fornos de calcinação e reações de redução de óxidos.

### **4. MODELOS PARA ANÁLISE DO EFEITO DOMINÓ EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS QUÍMICAS**

#### **4.1. Procedimentos para uma análise de efeito dominó**

O primeiro passo a ser conduzido numa análise do efeito dominó consiste na avaliação detalhada das conseqüências de um evento acidental primário (mísseis, carga térmica, sobrepressão) no local da unidade secundária.

A Fig. 3 apresentada por Khan, F.I., Abbasi, S.A. 1998 [5] ilustra o procedimento para uma análise de efeito dominó:

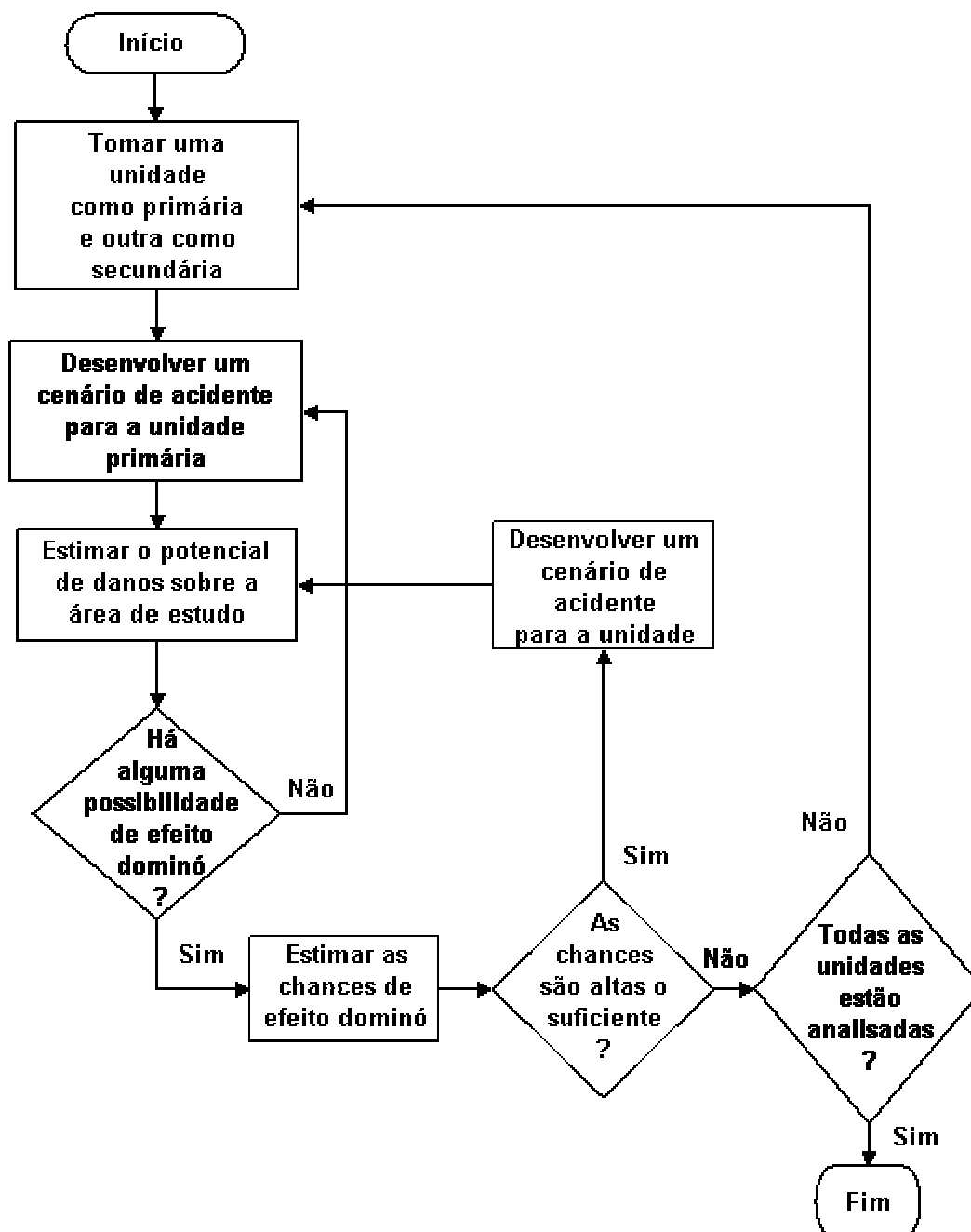


Figura 3. Procedimento para análise do efeito Dominó



Essa análise é realizada em dois níveis de estudo:

① Nível I do estudo:

Nesta seção é feita uma varedura para identificar as unidades propícias a serem alvos e desencadear o efeito dominó. Para isso serão usados os valores limites de danos para varios efeitos oriundos de eventos acidentais primários. Se os valores estimados desses parâmetros no local da unidade alvo forem maior que os valores limites será realizado um estudo detalhado conforme o nível II de estudo abaixo.

② Nível II do estudo:

Nesta seção será feita uma análise mais detalhada para verificar a existência do efeito dominó através do estudo do potencial de danos do primeiro evento e as características da segunda unidade. As características a serem consideradas são:

- material de construção da unidade,
- processo empregado e condições de operação,
- quantidade de produtos químicos envolvidos,
- propriedades dos produtos químicos envolvidos,
- localização da unidade em termos de distância e interligações, e
- direção predominante do vento.

## **4.2. Valores limites para danos**

Os valores limites (TDL: Target Threshold Limits) são parâmetros de avaliação da vulnerabilidade de componentes, sistemas ou equipamentos alvos a danos causados por acidentes ocorridos em outros equipamentos.

Os efeitos adversos aos quais os alvos estão expostos são:

- os efeitos térmicos devido a incêndios,
- os efeitos de sobrepressão devido a explosões,
- os efeitos causados pelo impacto de mísseis gerados por explosões.

### **4.2.1 Valores Limites de Danos por Sobrepressão para Efeitos Dominó na Interação com Equipamentos de Processo**

Inumeros estudos apontam para o fato de que a maior dificuldade encontrada na avaliação quantitativa do efeito dominó reside na disponibilidade de modelos confiáveis para se estimar a possibilidade e a probabilidade de danos na escalação de acidentes primários.

Estudos foram realizados por *Cozzani, V.; Salzano, E., 2004* [3] visando a análise do efeito dominó provocado por explosões de nuvem de vapor. Com esse objetivo os autores efetuaram uma revisão e análise dos modelos disponíveis para a avaliação quantitativa da probabilidade de danos em equipamentos de processo causados por ondas de choque geradas por explosões.

Constataram que os dados encontrados na literatura para valores limites usados na avaliação de danos em equipamentos e na possibilidade de ocorrência de efeitos dominó causados por ondas de choque apresentavam as seguintes características:

- valores muito diferentes de um autor para outro,
- os valores propostos são sempre genéricos e não levam em conta as características específicas de cada equipamento, sendo que estudos posteriores evidenciaram que diferenças grandes na intensidade de danos causados por ondas de choque ocorrem em equipamentos de processo diferentes,
- muitos valores estão relacionados apenas com pequenos danos na estrutura ou equipamento;
- outros valores estão possivelmente relacionados com o efeito dominó e envolve dano catastrófico ou colapso total na estrutura do equipamento seguido de uma provável grande perda de contenção.

Por outro lado a taxa de liberação do material contido é bastante influenciada por dois fatores:

- a área de escape causada pelo dano,
- as propriedades físico-químicas e condições de processo do material contido no vaso em estudo.

Consequentemente *Cozzani, V.; Salzano, E., 2004* [11] num estudo posterior propuseram valores limites de dano por sobrepressão para diferentes categorias de equipamentos e levando em conta níveis de danos ou intensidades de liberação provocadas pela perda de contenção.

A análise de possíveis cenários de acidentes secundários para as diferentes categorias de equipamentos possibilitou a definição de valores limites adicionais para a avaliação de efeitos dominó causados por ondas de choque provocadas por explosões. Esses valores são bastante úteis para uma identificação preliminar dos equipamentos de processo candidatos a equipamento “alvo” dos efeitos das ondas de choque.

#### **4.2.2 Valores Limites de Danos por Radiação térmica para Efeitos Dominó na Interação com Equipamentos de Processo**

O efeito da radiação térmica sobre equipamentos de processo e estruturas depende do material de construção desses equipamentos e do tempo de exposição. Muitas estruturas de aço sob cargas térmicas normais tendem a falhar rapidamente quando aquecidas a 500 – 600°C, enquanto que estruturas de concreto resistem mais. O envolvimento direto de estruturas ou cascos de equipamentos por chamas causa danos mais severos que a exposição à radiação térmica.

A Tab. 3 apresenta alguns dados apresentados na literatura por Barry, T.F. 2003 [8]

O aço utilizado na construção de equipamentos de processo apresenta três características de interesse sob condições de incêndio:

- ⇒ o aço expande substancialmente quando aquecido
- ⇒ o aço perde muito de sua resistência quando aquecido a 480 – 540°C
- ⇒ o aço transmite calor rapidamente para materiais combustíveis contidos em vasos.

**Tabela 3. Alguns valores limites de danos por radiação térmica**

<b>Fluxo de calor incidente (kW/m<sup>2</sup>)*</b>	<b>Danos ao equipamento</b>	<b>Observações</b>
35,0 a 37,5	Danos a equipamentos de processo	Geralmente tanques de aço, equipamento de processo e máquinas industriais
25	Energia de ignição mínima da madeira sob exposição longa sem chamas	
18,0 a 20,0	Degradação de isolantes de cabos	
12,5 a 15,0	Energia de ignição mínima da madeira sob chamas; fusão de tubulações de material plástico	
* Baseado num tempo de exposição médio de 10 min		

### **4.3. Métodos para calcular alcance de mísseis**

O risco de mísseis num dado local está relacionado ao número de fragmentos que podem atingir este local e ao potencial de danos que possuem em função de suas massas e velocidades.

A *TNO em seu 'Yellow Book'* [9] 1997 propõe vários métodos para a estimativa da distância atingida por um míssil oriundo da explosão e ruptura de um vaso de processo.

Numa primeira etapa é feita uma estimativa do número de fragmentos gerados pela explosão através de uma aproximação prática baseada em cima da análise de explosões acidentais históricas.

Numa segunda etapa é feita uma estimativa da massa do fragmento também através de uma aproximação prática levando em conta o tipo de vaso rompido e a forma dos fragmentos.

A terceira etapa se propõe a calcular a velocidade do fragmento expelido por varios métodos em função do tipo de explosão do vaso.

Os resultados obtidos são verificados com o Método de Moore. Se a velocidade calculada anteriormente for maior que o valor obtido pela relação empírica de Moore o seu valor é muito alto; prevalece a segunda velocidade.

A quarta e ultima etapa consiste no cálculo do alcance atingido pelo fragmento.

A Tab. 4 resume os métodos propostos.

**Tabela 3. Seleção de métodos para efeitos de fragmentação dependendo do tipo de explosão**

<b>Tipo de explosão</b>	<b>Método</b>
Estimativa grosseira para todo tipo de explosão de vasos, com exceção de decomposição energética de materiais	Método da energia cinética
Explosão física de vaso pressurizado	Métodos de Baker e/ou de Gel'fand's
Reação descontrolada, explosão interna	Método de Gel'fand's
BLEVE	Fórmula empírica de Baum's
Para pressões altas e decomposição de materiais energéticos	Relação empírica de Moore

#### **4.4 Estimativa de probabilidade de ocorrência de um segundo evento (efeito dominó)**

Obtido o potencial de dano do primeiro evento a estimativa de probabilidade de ocorrência do segundo evento será obtida conforme os procedimentos abaixo propostos por *Khan, F.I., Abbasi, S.A. 1998* [4].

##### **4.4.1. Probabilidade de efeito dominó devido à radiação térmica de um incêndio**

Conforme a proposta de procedimento de análise do efeito dominó de Khan, F.I., Abbasi, S.A. 1998 [4] cerca de 60% do calor total da radiação incidente sobre um vaso é absorvido pelo casco (calor 1) enquanto os 40% da energia restante passa para o produto contido no vaso elevando a sua temperatura e pressão (calor 2, pressão  $P_2$ ). O aumento de temperatura pode ser avaliado em termos de um aumento de pressão considerando a lei dos gases ideais assumindo que o conteúdo do vaso (para o caso de um gás pressurizado) apresente um comportamento ideal. Para gases liquefeitos a energia absorvida pelo produto químico leva a formação de vapor. Se a pressão atingir um valor maior que a pressão de alívio pode ocorrer liberação do produto químico contido no vaso pela válvula de alívio e se ela superar a pressão de projeto do vaso o mesmo pode se romper. O excesso de pressão e as propriedades mecânicas do material de construção do qual é feito o vaso estão intimamente ligadas à severidade do segundo acidente.

A probabilidade de ocorrência de um acidente secundário devido ao aumento de pressão dentro do vaso será:

$$\text{Prob}_{\text{calor 2}} = (P_2 - P_{\text{alívio}}) / P_{\text{alívio}}$$

#### 4.4.2. Probabilidade de efeito dominó devido à ruptura do vaso por falha do material de construção

A radiação térmica gerada por um incêndio aumenta a temperatura da parede do vaso. Este acréscimo de temperatura reduz a tensão máxima admissível do vaso. Por outro lado o aumento da pressão interna do produto contido no vaso aumenta devido ao calor absorvido.

A probabilidade de um acidente secundário devido a carga térmica é dada por:

$$\text{Prob}_{\text{radiação}} = \text{Prob}_{\text{calor1}} \cup \text{Prob}_{\text{calor2}}$$

$$\text{Prob}_{\text{radiação}} = \text{mínimo} [ 1, \{(1 - \text{Prob}_{\text{calor1}}) * (1 - \text{Prob}_{\text{calor2}})\}]$$

#### 4.4.3. Probabilidade de efeito dominó devido a sobrepressão causada por uma explosão

Quando uma onda de pressão desenvolvida por uma explosão atinge um objeto ocorre um impacto. O provável dano devido a esse impacto é medido pela sobrepressão efetiva  $P_e$  na frente da onda.

$$P_d = C_d * p^0$$

$$P_e = p^0 + p_d$$

onde,  $P_d$  é a pressão dinâmica,  $p^0$  o pico de sobrepressão e  $C_d$  o coeficiente de arraste (= 0,1 para esfera, 1,2 para cilindro)

$$\text{Pr}_{\text{sobrepressão}} = -23,8 + 2,92 * \ln P_e$$

Ou seja, a probabilidade de danos devido à explosão é:

$$\text{Prob}_{\text{sobrepressão}} = \text{fr} (P_{\text{r}_{\text{sobrepressão}}})$$

onde fr representa a função probit e  $P_e$  a pressão efetiva da explosão em [Pa].

#### 4.4.4. Probabilidade de efeito dominó devido a impacto de mísseis

O impacto de mísseis sobre unidades secundárias é avaliado usando três parâmetros:

① Penetração, A:

$$\text{Prob}_A = (\text{penetração} - \text{espessura do vaso}) / \text{penetração}$$

② Energia de impacto, B:

Cerca de 40 – 50% da energia total de impacto causa o aumento da temperatura do produto contido na segunda unidade. Usando os valores calculados em 4.3. para a massa e velocidade do fragmento obtem-se a energia transferida ao produto contido no vaso. O aumento de temperatura pode ser avaliado em termos de um aumento de pressão considerando a lei dos gases ideais assumindo que o conteúdo do vaso (para o caso de um gas pressurizado) apresente um comportamento ideal. Para gases liquefeitos a energia absorvida pelo produto químico leva a formação de vapor. Se a pressão atingir um valor maior que a pressão de alívio pode ocorrer liberação do produto químico contido no vaso pela válvula de alívio e se ela superar a pressão de projeto do vaso o mesmo pode se romper. O excesso de pressão e as propriedades mecânicas do material de construção do qual é feito o vaso estão intimamente ligas à severidade do segundo acidente.

A probabilidade de ocorrência de um acidente secundário devido ao aumento de pressão dentro do vaso será:

$$\text{Prob}_B = (P_2 - P_{\text{alívio}}) / P_{\text{alívio}}$$

③ Probabilidade de colisão, C:

Na proposta de *Khan, F.I., Abbasi, S.A. 1998* [4] a probabilidade de colisão é calculada dividindo-se o volume do vaso pelo volume da semi-esfera de raio igual à distância entre os vasos incluído o diâmetro do vaso.

$$\text{Prob}_C = \text{volume do vaso} / \text{volume da semi-esfera}$$

Assim a probabilidade do efeito dominó devido aos impactos de mísseis é:

$$\text{Prob}_{\text{míssel}} = (\text{Prob}_A) \cup (\text{Prob}_B) \cup (\text{Prob}_C)$$

$$\text{Prob}_{\text{míssel}} = \text{mínimo} [1, \{(1 - \text{Prob}_A) * (1 - \text{Prob}_B) * (1 - \text{Prob}_C)\}]$$

Finalmente a probabilidade de ocorrência do efeito dominó será a soma das probabilidades de cada evento contribuinte e pode ser estimado por:

$$\text{Prob}_{\text{dominó}} = (\text{Prob}_{\text{radiação}}) \cup (\text{Prob}_{\text{sobrepressão}}) \cup (\text{Prob}_{\text{míssil}})$$

$$\text{Prob}_{\text{dominó}} = \text{mínimo} [1, \{1 - (1 - \text{Prob}_{\text{radiação}})^t * (1 - \text{Prob}_{\text{sobrepressão}}) * (1 - \text{Prob}_{\text{míssil}})\}]$$

$$\text{Prob}_{\text{dominó}} = \text{Prob}_{\text{dominó}} \cap \text{Prob}_{\text{primário}}$$

onde  $\text{Prob}_{\text{primário}}$  representa a probabilidade (por ano) de ocorrência do primeiro evento.

## 5. CONCLUSÕES

É importante salientar o fato que acidentes de baixa gravidade em instalações químicas podem desencadear acidentes maiores pelo “efeito dominó” pois a probabilidade de ocorrência desse efeito cascata depende não somente do potencial de danos do acidente primário mas de numerosos outros fatores como as características, localização e aspectos ambientais da unidade alvo. Conseqüentemente uma análise de riscos ou de segurança completa requer um estudo profundo do efeito dominó para justamente salientar a possibilidade de ocorrências de acidentes maiores com conseqüências graves para a planta em estudo e instalações circunvizinhas.

## REFERÊNCIAS

1. A.I.C.H.E., *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York (1994).
2. A.I.C.H.E., *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York (2000).
3. E. Salzano, V. Cozzani, “The Analysis of domino accidents triggered by vapor cloud explosions”, *Reliability Engineering & System Safety*, **xx**, pp. 1-14 (2005).
4. F.I Khan and S.A Abbasi, “Models for Domino Effect Analysis in Chemical Process Industries”, *Process Safety Progress*, **Vol. 17, Nº. 2**, pp. 107-122 (1998).
5. F.I Khan and S.A Abbasi, “DOMIFFECT (DOMIno eFFECT): user-friendly software for domino effect analysis”, *Environmental Modelling & Software*, **Vol.13**, pp. 163-177 (1998)
6. F.I Khan and S.A Abbasi, “An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries”, *Journal of Loss Prevention in the process industries*, **Vol. 14**, pp. 283-306 (2001).

7. F. P. Lee, *Loss Prevention in the Process Industries*, Butterworth/Heinemann, London (1996)
8. T.F. Barry, “Fire Exposure Profile Modeling; Some Threshold Damage Limit (TDL) Data”, [www.fireriskforum.com](http://www.fireriskforum.com).
9. J.C.A.M. van Doormaal, R.M.M. van Wees, “Rupture of vessels”, TNO (“Yellow Book” Chapter 7) 1997.
10. J.G Gledhill, Ian Lines, “Development of methods to assess the significance of domino effects from major hazard sites”, Health & Safety Executive (1998).
11. V. Cozzani and E. Salzano, “Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment”, *Journal of Loss Prevention in the process industries*, **Vol. 17**, pp. 437-447 (2004).