INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**UM ESTUDO SOBRE O EFEITO DOMINÓ EM INSTALAÇÕES DO CICLO
DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR**

JEAN-CLAUDE BOZZOLAN

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre
em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear-Reatores**

Orientador:
Dr. José Messias de Oliveira Neto

SÃO PAULO 2006

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Dr. José Messias de Oliveira Neto, pela correção e orientação deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), pela permissão para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas do CEN pelo incentivo e pelo companheirismo.

UM ESTUDO SOBRE O EFEITO DOMINÓ EM INSTALAÇÕES DO CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Jean–Claude Bozzolan

RESUMO

Os acidentes causados pelo efeito dominó são dos mais graves ocorridos na indústria química e de processo. Mesmo sendo o potencial destrutivo desses eventos acidentais bastante conhecido, pouca atenção tem sido dada a este problema pela literatura técnica e uma metodologia completa e aprovada para a avaliação quantitativa da contribuição do efeito dominó ao risco industrial ainda não está plenamente desenvolvida. O presente estudo propõe um procedimento sistemático para a avaliação quantitativa do efeito dominó em plantas químicas do ciclo do combustível nuclear. O trabalho é baseado em avanços recentes feitos na modelagem de danos a equipamentos de processo causados por incêndios e explosões devido aos vetores de propagação (radiação de calor, sobrepressão e projeção de fragmentos). Dados disponíveis na literatura técnica e novos modelos de vulnerabilidade deduzidos para diversas categorias de equipamentos de processo foram utilizados no presente trabalho. O procedimento proposto é aplicado a uma área de tancagem típica de uma planta de reconversão situada em um sítio que abriga varias outras instalações do ciclo do combustível nuclear. São analisados os vários eventos iniciadores, seus vetores de propagação, as conseqüências desses eventos e as frequências associadas ao efeito dominó.

A STUDY ON DOMINO EFFECT IN NUCLEAR FUEL CYCLE FACILITIES

Jean–Claude Bozzolan

ABSTRACT

Accidents caused by domino effect are among the most severe accidents in the chemical and process industry. Although the destructive potential of these accidental scenarios is widely known, little attention has been paid to this problem in the technical literature and a complete methodology for quantitative assessment of domino accidents contribution to industrial risk is still lacking. The present study proposed a systematic procedure for the quantitative assessment of the risk caused by domino effect in chemical plants that are part of nuclear fuel cycle plants. This work is based on recent advances in the modeling of fire and explosion damage to process equipment due to different escalation vectors (heat radiation, overpressure and fragment projection). Available data from literature and specific vulnerability models derived for several categories of process equipment had been used in the present work. The proposed procedure is applied to a typical storage area of a reconversion plant situated in a complex that shelters other nuclear fuel cycle facilities. The top-events and escalation vectors are identified, their consequences estimated and credible domino scenarios selected on the basis of their frequencies.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo da Dissertação.....	1
1.2 Estrutura da dissertação.....	2
2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES.....	3
2.1 Definições do efeito dominó.....	3
2.2 Tipos de efeito dominó.....	3
2.3 Mecanismos do efeito dominó.....	6
3 BREVE ANÁLISE DE ACIDENTES GRAVES OCORRIDOS EM INSTALAÇÕES QUÍMICAS.....	10
4 O EFEITO DOMINÓ NA ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS.....	24
4.1 Objetivo da Análise Quantitativa de Riscos (AQR).....	24
4.2 Metodologia da Análise Quantitativa de Riscos.....	24
4.3 A Metodologia ARAMIS (<u>A</u> ccidental <u>R</u> isk <u>A</u> ssessment <u>M</u> ethodology for <u>I</u> ndustrie <u>S</u> in the context of the Seveso II Directive).....	30
5 METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DO EFEITO DOMINO.....	34
5.1 Definição do efeito dominó.....	34
5.2 Identificação dos eventos acidentais primários.....	34
5.3 Identificação dos eventos acidentais secundários.....	58
5.4 Vetores de Propagação e Valores Limites de Danos.....	61
5.5 Cálculo das frequências dos eventos acidentais secundários.....	69
5.6 Cálculo das conseqüências dos eventos acidentais secundários.....	71
6 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO E RESULTADOS.....	73
6.1 Introdução.....	73
6.2 Aplicação da Metodologia MIPAG.....	73
6.3 Análise de conseqüências.....	102
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
APÊNDICES.....	125
APÊNDICE A – Classificação de substâncias perigosas.....	125
APÊNDICE B – Fragmentos.....	127
APÊNDICE C – Análise de conseqüências.....	144

APÊNDICE D – Modelos SAFETI®.....	169
-----------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

	Página
2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	
Figura 2.3.1 Efeito dominó desencadeado por um incêndio.....	8
Figura 2.3.2 Efeito dominó desencadeado por uma explosão.....	9
3 BREVE ANÁLISE DE ACIDENTES GRAVES OCORRIDOS EM INSTALAÇÕES QUÍMICAS	
Figura 3.1 Identificação das áreas perigosas para as empresas A e B.....	11
Figura 3.2 Classificação dos acidentes (nº de acidentes).....	16
Figura 3.3 Classificação dos acidentes em transportes.....	16
Figura 3.4 Propagação de eventos acidentais.....	22
Figura 3.5 Eventos iniciadores (eventos primários).....	22
Figura 3.6 Eventos secundários.....	23
Figura 3.7 Eventos terciários.....	23
4 O EFEITO DOMINÓ NA ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS	
Figura 4.2.1 Etapas de um estudo da Análise Quantitativa de Riscos.....	26
Figura 4.2.2 Efeitos Dominó internos e externos.....	28
Figura 4.2.3 Exame do efeito dominó numa análise de riscos.....	29
5 METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DO EFEITO DOMINO	
Figura 5.2.1 Etapas Principais da MIPAG.....	35
Figura 5.2.2 Procedimentos preliminares para a identificação de equipamentos perigosos.....	39
Figura 5.2.3 Exemplo de Árvore de falhas.....	48
Figura 5.2.4 Exemplo de Árvore de eventos.....	50
Figura 5.2.5 Diagrama tipo “gravata borboleta”.....	57
Figura 5.3.1 Procedimento para a análise do efeito dominó.....	59
Figura 5.4.1 Metodologia para determinação do alcance máximo de fragmentos.....	67
Figura 5.6.1 Procedimento para a análise do efeito dominó.....	72

6 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO E RESULTADOS

Figura 6.1.1	Complexo Industrial Nuclear para fabricação de Elementos Combustíveis.	74
Figura 6.1.2	Arranjo físico da Área de Estocagem da Planta de Reconversão.....	76
Figura 6.2.1	Árvore de falhas para “Furo grande no casco_Fase Líquida ou Fase Vapor”	87
Figura 6.2.2	Árvore de falhas para “Furo médio no casco_Fase Líquida ou Fase Vapor”	88
Figura 6.2.3	Árvore de falhas para “Furo pequeno no casco_Fase Líquida ou Fase Vapor”	89
Figura 6.2.4	Árvore de falhas para “Vazamento grande na tubulação_Fase Líquida ou Fase Vapor”	90
Figura 6.2.5	Árvore de falhas para “Vazamento médio na tubulação_Fase Líquida ou Fase Vapor”	91
Figura 6.2.6	Árvore de falhas para “Vazamento pequeno na tubulação_Fase Líquida ou Fase Vapor”	92
Figura 6.2.7	Árvore de falhas para “ruptura catastrófica”	93
Figura 6.2.8	Árvore de Eventos para “Furo no casco_Lado líquido”	97
Figura 6.2.9	Árvore de Eventos para “Furo no casco_Lado vapor”	98
Figura 6.2.10	Árvore de Eventos para “Vazamento líquido numa tubulação”	99
Figura 6.2.11	Árvore de Eventos para “Vazamento gasoso numa tubulação”	100
Figura 6.2.12	Árvore de Eventos para “Ruptura catastrófica”	101
APÊNDICES		

Figura B.1	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos esféricos contendo gás ideal.....	133
Figura B.2	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com $L_v/d_v=5$ contendo gás ideal.....	134
Figura B.3	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com $L_v/d_v=10$ contendo gás ideal.....	135
Figura B.4	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos esféricos com ruptura devida à reações químicas fora de controle.....	136

Figura B.5 Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com ruptura devida à reações químicas fora de controle e $Lv/dv=5$	137
Figura B.6 Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com ruptura devida à reações químicas fora de controle e $Lv/dv=10$	138
Figura B.7 Previsão de alcance de fragmentos.....	139
Figura B.8 Representação de um fragmento e seu impacto num alvo.....	142
Figura B.9 Valores dos parâmetros z_1 , z_2 e z_3	143
Figura C.1.1 Características dos vasos cilíndricos horizontais.....	144
Figura C.1.2 Características dos vasos cilíndricos verticais.....	145
Figura C.1.3 Características dos vasos de metanol.....	146

LISTA DE TABELAS

	Página
2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	
Tabela 2.2.1 Natureza dos efeitos físicos.....	5
Tabela 2.2.2 Ocorrência de efeito dominó por tipos de equipamento.....	5
3 BREVE ANÁLISE DE ACIDENTES GRAVES OCORRIDOS EM INSTALAÇÕES QUÍMICAS	
Tabela 3.1 Causas principais de incêndios nas indústrias químicas.....	13
Tabela 3.2 Causas principais de explosões nas indústrias químicas.....	13
Tabela 3.3 Liberações acidentais em vasos de processo e tubulações.....	14
Tabela 3.4 Principais acidentes envolvendo Efeito Dominó.....	18
Tabela 3.5 Acidentes envolvendo tanques de hidrocarbonetos.....	19
Tabela 3.6 Acidentes envolvendo tanques de estocagem.....	19
Tabela 3.7 Acidentes envolvendo tubulações.....	19
Tabela 3.8 Acidentes envolvendo estocagem a granel interna ou externa.....	20
Tabela 3.9 Acidentes envolvendo reatores químicos.....	20
Tabela 3.10 Acidentes envolvendo instalações contendo amônia.....	20
Tabela 3.11 Acidentes ocorridos durante o transporte.....	21
5 METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DO EFEITO DOMINO	
Tabela 5.2.1 Categorias de substâncias perigosas.....	37
Tabela 5.2.2 Tipos de equipamento.....	37
Tabela 5.2.3 Massas de Referência Ma.....	41
Tabela 5.2.4 Parâmetros do MIPAG.....	42
Tabela 5.2.5 Matriz estado da substância (EST) – tipo de equipamento (EQ).....	44
Tabela 5.2.6 Matriz tipo de equipamento (EQ) – eventos críticos primários (ECP).....	45
Tabela 5.2.7 Matriz estado da substância (EST) / (ECP).....	46
Tabela 5.2.8 Lista de árvores de falhas genéricas propostas pelo MIPAG.....	47
Tabela 5.2.9 Matriz ECP / EST / ECS.....	51
Tabela 5.2.10 Matriz ECS – ECT.....	55

Tabela 5.2.11	Matriz ECT – FP.....	56
Tabela 5.3.1	Etapas de cálculo do SAFETI®.....	60
Tabela 5.4.1	Valores Limites de Danos por sobrepressão (kPa).....	64
Tabela 5.4.2	Cenários secundários esperados.....	64
Tabela 5.4.3	Potencial de propagação.....	65
Tabela 5.4.4	Tempos de falha t_{fr} de equipamentos.....	65
Tabela 5.5.1	Modelos “probit” para probabilidade de dano.....	70

6 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO E RESULTADOS

Tabela 6.2.1	Dados das substâncias e condições de armazenamento na área de estocagem da reconversão.....	77
Tabela 6.2.2	Identificação de Equipamentos Perigosos.....	79
Tabela 6.2.3	Matriz EST-EQ.....	80
Tabela 6.2.4	Matriz EQ-ECP.....	81
Tabela 6.2.5	Matriz EST-ECP.....	82
Tabela 6.2.6	Matriz EQ_EST_ECP.....	83
Tabela 6.2.7	Lista de árvores genéricas propostas pelo MIPAG para os eventos críticos selecionados.....	86
Tabela 6.2.8	Matriz ECP-EST-ECS.....	94
Tabela 6.2.9	Matriz ECS-ECT.....	95
Tabela 6.2.10	Matriz ECT-FP.....	96
Tabela 6.3.1	Fenômenos Perigosos selecionados.....	103
Tabela 6.3.2	Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-001.....	105
Tabela 6.3.3	Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-002.....	106
Tabela 6.3.4	Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-003.....	107
Tabela 6.3.5	Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-004.....	108
Tabela 6.3.6	Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-005.....	109
Tabela 6.3.7	Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-006.....	110
Tabela 6.3.8	Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-007.....	111
Tabela 6.3.9	Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-001).....	114
Tabela 6.3.10	Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-002).....	115
Tabela 6.3.11	Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-003).....	116
Tabela 6.3.12	Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-004).....	117
Tabela 6.3.13	Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-005).....	117

Tabela 6.3.14 Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-006).....	118
Tabela 6.3.15 Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-007).....	118
Tabela 6.3.16 Frequência do evento crítico primário.....	119
Tabela 6.3.17 Frequência do evento acidental primário.....	119
Tabela 6.3.18 Frequência do evento acidental secundário.....	120
Tabela 6.3.19 Eventos do tipo efeito dominó identificados.....	120
APÊNDICES	
Tabela B.1 Aproximação prática para uma estimativa do número de fragmentos.....	127
Tabela B.2 Sugestões de forma e massa de fragmentos.....	127
Tabela B.3 Métodos para a estimativa da velocidade do fragmento.....	127
Tabela B.4 Método da Energia Cinética.....	128
Tabela B.5 Métodos de Baker e/ou Gel'fand.....	129
Tabela B.6 Velocidade laminar de queima máxima para gases e vapores inflamáveis no ar em condições atmosféricas.....	130
Tabela B.7 Método de Moore.....	130
Tabela B.8 Estimativa do alcance máximo dos fragmentos projetados.....	131
Tabela B.9 Arraste e ascensão de fragmentos.....	131
Tabela C.1.1 Coordenadas dos equipamentos (origem no centro do vaso VP-001).....	147
Tabela C.1.2 Dados meteorológicos do sítio.....	147
Tabela C.1.3 Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / E 3,5 m/s_direção do vento=0°.....	148
Tabela C.1.4 Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / D 5,0 m/s_direção do vento=30°.....	149
Tabela C.1.5 Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / D 5,0 m/s_direção do vento=90°.....	150
Tabela C.1.6 Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / E 3,5 m/s_direção do vento=0°.....	151
Tabela C.1.7 Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / D 5,0 m/s_direção do vento=30°.....	152
Tabela C.1.8 Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / D 5,0 m/s_direção do vento=90°.....	153
Tabela C.1.9 Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / E 3,5 m/s_direção do vento=0°.....	154

Tabela C.1.10 Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / D 5,0 m/s_direção do vento=30°.....	155
Tabela C.1.11 Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / D 5,0 m/s_direção do vento=90°.....	156
Tabela C.1.12 Análise de vulnerabilidade / BLEVE_Sobreprensão / E 3,5m/s – D 5,0 m/s.....	157
Tabela C.1.13 Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / E 3,5 m/s_direção do vento=0°.....	158
Tabela C.1.14 Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / D 5,0 m/s_direção do vento=30°.....	159
Tabela C.1.15 Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / D 5,0 m/s_direção do vento=90°.....	160
Tabela C.1.16 Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / E 3,5 m/s_direção do vento=0°.....	161
Tabela C.1.17 Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / D 5,0 m/s_direção do vento=30°.....	162
Tabela C.1.18 Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / D 5,0 m/s_direção do vento=90°.....	163
Tabela C.1.19 Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / E 3,5 m/s_direção do vento=0°.....	164
Tabela C.1.20 Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / D 5,0 m/s_direção do vento=30°.....	165
Tabela C.1.21 Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / D 5,0 m/s_direção do vento=90°.....	166
Tabela C.1.22 Análise de vulnerabilidade / BLEVE_Sobreprensão / E 3,5m/s – D 5,0 m/s.....	167
Tabela C.2.1 Alcance máximo e probabilidade de impacto dos fragmentos (Vaso VP-002).....	168
Tabela C.2.2 Alcance máximo e probabilidade de impacto dos fragmentos (Vaso VP-004).....	168
Tabela C.2.3 Alcance máximo e probabilidade de impacto dos fragmentos (Vaso VP-005).....	168
Tabela C.2.4 Alcance máximo e probabilidade de impacto dos fragmentos (Vaso VP-006).....	168

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo da Dissertação

As plantas industriais nucleares assim como os centros de pesquisas nucleares abrigam vários tipos de instalações químicas que produzem ou processam materiais radioativos, bem como substâncias químicas perigosas normalmente encontradas na indústria química convencional. Os processos empregados e os materiais manipulados e estocados representam fontes potenciais de perigos de naturezas diversas, como incêndio, explosão, geração de fragmentos e liberação de materiais tóxicos.

Em 1999 a Agência Internacional de Energia Atômica IAEA, estabeleceu um programa para coletar informações sobre regulamentações em vigor e medidas de segurança aplicadas nas instalações químicas do Ciclo do Combustível Nuclear de todos os países membros. Verificou-se que existiam 250 instalações em operação e cerca de 60 outras unidades ainda em construção. O relatório da Agência revelou a ocorrência de mais de 25 eventos acidentais ocorridos nessas instalações. Baseado nesse estudo a IAEA publicou, em maio de 2000, o relatório “Safety of and Regulations for Nuclear Fuel Cycle Facilities” IAEA-TECDOC-1221¹, sobre aspectos de segurança e práticas regulamentares nacionais em instalações do Ciclo do Combustível Nuclear.

As normas da Comissão Nacional de Energia Atômica – CNEN^{2,3} aplicáveis às instalações do ciclo do combustível nuclear incluem aspectos que podem estar relacionados ao efeito dominó. É exigido, por exemplo, “*relacionar e avaliar os efeitos considerados como potencialmente perigosos para as instalações da fábrica devido à proximidade de atividades identificadas como instalações militares, industriais e redes de transporte próximas*”.

Assim a avaliação e o gerenciamento dos riscos dos processos envolvidos nessas unidades fazem parte do panorama atual da indústria nuclear através da elaboração de análises de riscos para atender exigências da legislação em vigor. Entretanto a maior parte das análises de riscos elaboradas não inclui avaliações qualitativas, quantitativas e probabilísticas de cadeias de acidentes em que incêndios, explosões, fragmentos e nuvens tóxicas geradas em uma unidade da instalação causam acidentes graves secundários em outras unidades ou mesmo em instalações vizinhas. Essa propagação de acidentes é mais conhecida por “*Efeito Dominó*”.

O objetivo desta Dissertação de Mestrado é o de estudar a possibilidade de ocorrência do efeito dominó e de propor uma metodologia capaz de considerar e avaliar quantitativamente esse efeito em uma unidade química do ciclo do combustível nuclear. O presente estudo apresenta, um procedimento sistemático para a avaliação quantitativa da contribuição do efeito dominó para com o risco baseando-se nos trabalhos de F.I Khan^{4,5,6}, S.A Abbasi^{4,5,6}, V. Cozzani^{7,8,9,10}, E. Salzano^{7,8,9}, G Gubinelli^{10,11} e outros^{12,13}.

1.2 Estrutura da Dissertação

Em seguida à presente introdução, são apresentados no Capítulo 2, os principais conceitos e definições, citados na literatura, relativos ao efeito dominó.

O Capítulo 3 apresenta um breve histórico de acidentes significativos, do ponto de vista de danos, ferimentos e fatalidades, e ocorridos em instalações da indústria química em geral. Tem destaque também neste capítulo um resumo histórico e técnico dos tipos de eventos ocorridos assim como os tipos de instalações envolvidas.

No Capítulo 4 são apresentados brevemente os aspectos teóricos da Análise Quantitativa de Riscos (AQR) e como o efeito dominó é considerado e avaliado neste tipo de análise.

O Capítulo 5 trata da metodologia para a análise do efeito dominó em uma Análise Quantitativa de Riscos.

No Capítulo 6 é realizado um estudo de caso aplicado a uma instalação química do Ciclo do Combustível Nuclear, utilizando, para isto, o programa de computador SAFETI®.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões da dissertação sobre o assunto tratado.

As referências bibliográficas consultadas e mencionadas ao longo da dissertação são listadas em seguida.

Os Apêndices ao presente estudo estão agrupados no fim da Dissertação.

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. Definições do Efeito Dominó

O fenômeno conhecido por “efeito dominó” não possui uma única definição.

Bagster, D.F. e Pitblado, R.M.¹⁴ definiram o “efeito dominó” como: *“Uma perda de contaminante de um item de uma planta, resultante de um acidente grave nesta planta ou em unidades próximas”*.

Lees, F.P.¹⁵, por sua vez, aborda o fenômeno como sendo: *“Um risco que pode ocorrer se o vazamento de um material perigoso conduzir a uma propagação de acidente”*.

Delvosalle, C.¹⁶ trata o fenômeno como sendo: *“Um 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. e Abbasi, S.A.⁴ definiram o “efeito dominó” como: *“Uma 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 pode-se concluir que o efeito dominó implica na ocorrência de um acidente “primário”, eventualmente sem gravidade, afetando uma instalação “primária”, induzindo um ou mais acidentes “secundários” que afetarão uma ou mais instalações “secundárias”. Esses acidentes “secundários” podem ser mais graves e podem contribuir para ampliar os danos do acidente primário. É importante notar que um acidente pode provocar mais de um efeito secundário.

2.2. Tipos de Efeito Dominó

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

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

Os principais efeitos físicos associados aos acidentes primários e secundários são de origem mecânica e térmica conforme mostra a tabela 2.2.1, extraída do artigo *Análisis de consecuencias – El efecto dominó*¹⁷ do GUIAR – Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos – Universidad de Zaragoza.

A análise de acidentes passados¹⁷ identificou cinco tipos principais de equipamentos industriais mais afetados pelo efeito dominó: tanques de estocagem pressurizados, tanques de estocagem atmosféricos ou criogênicos, equipamentos de processo, redes de tubulação e outros equipamentos de processo. A tabela 2.2.2 extraída do mesmo artigo mostra que tanques de estocagem e equipamentos de processo são as maiores fontes potenciais do efeito dominó.

Normalmente não se considera liberações tóxicas seguida de pânico e fuga de operadores, como causa de efeito dominó. A não adoção de ações de emergência, proteção e controle adequadas e necessárias é considerada um produto de uma má gestão da segurança da empresa, de um plano de emergência inadequado e não representa causa direta de propagação de acidentes.

O efeito dominó pode também ser classificado conforme o tipo de causa em duas categorias principais:

- Efeito dominó direto: quando o fenômeno é causado diretamente pela perda de contenção de um equipamento de uma planta industrial próxima, pela liberação da substância contida, pelo incêndio ou explosão da mesma, e
- Efeito dominó indireto: quando o fenômeno é ocasionado por falhas nos equipamentos e/ou na planta industrial provocado por um evento inicial ou pelas consequências desse evento nas ações operacionais de controle do equipamento e/ou planta. Neste caso o acidente primário pode causar problemas em outras áreas ou unidades próximas devido a sistemas de segurança não confiável e a falta de sistemas automáticos de segurança.

O período de tempo em que o efeito dominó se desenvolve, a partir da ocorrência do evento primário, pode caracterizar o fenômeno como: efeito dominó imediato, quando acontece imediatamente (em intervalos de segundos) e efeito dominó gradual, quando ocorre gradativamente (em intervalos de minutos). Esta característica do efeito dominó é importante pelo fato de estar intimamente relacionada ao potencial de controle e mitigação do fenômeno acidental.

TABELA 2.2.1 - Natureza dos efeitos físicos¹⁷

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

TABELA 2.2.2 - Ocorrência de efeito dominó por tipos de equipamento¹⁷

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

2.3 Mecanismos do efeito dominó

O efeito dominó pode ser desencadeado pela ocorrência de incêndios, que geram cargas térmicas e explosões, que geram ondas de choque e mísseis.

O incêndio é caracterizado pela oxidação não controlada de um produto combustível em presença de oxigênio e com liberação de calor. Um incêndio numa unidade gera uma carga térmica que pode ter energia suficiente para superar a resistência do material de construção de equipamentos próximos 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 plantas químicas. A figura 2.3.1 desenvolvida por Khan, F.I., Abbasi, S.A.^{4,5}, ilustra as principais etapas ligadas à análise do efeito dominó provocado por um incêndio. Nessa figura são identificados vários tipos de modalidade de incêndios:

- **Jato de fogo:** combustão de uma substância emergente de um vaso ou tubulação, a partir de um orifício e com uma certa quantidade de movimento.
- **Incêndio de poça:** combustão em uma poça de uma substância derramada acidentalmente.
- **Incêndio em nuvem:** combustão de uma mistura de vapor de uma substância inflamável e ar numa nuvem em dispersão pela atmosfera.
- **Bola de fogo:** combustão instantânea e superficial de uma mistura de vapor e pequenas partículas líquidas de uma substância inflamável dispersada acidentalmente e de modo violento quando da ruptura catastrófica repentina do vaso que a contém. Este tipo de incêndio está associado à ocorrência de um evento acidental conhecido por BLEVE (“Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion”) e que consiste na ruptura do vaso de estocagem de uma substância líquida pressurizada devido a um incêndio de poça com chamas envolventes e a conseqüente perda de resistência mecânica do seu casco. Conseqüentemente há uma liberação instantânea de uma grande quantidade da substância contida para a atmosfera que por ignição pode gerar uma bola de fogo.

Incêndios do tipo “incêndio de nuvem” e “bola de fogo” possuem maior potencial de danos em termos de radiação térmica que o incêndio de poça e o jato de fogo para o mesmo produto químico com as mesmas quantidades, mas o tempo de exposição dos vasos alvos é bem menor. Unidades trabalhando sob condições extremas de temperatura e pressão são mais vulneráveis à radiações térmicas incidentes. De um modo geral incêndios são potencialmente capazes de provocarem explosões (nuvem de vapor

explosiva e explosão em fase rarefeita) em unidades com manipulação de gases liquefeitos inflamáveis em condições altamente pressurizados.

Uma explosão é definida como uma liberação instantânea e violenta de energia. Em plantas de processos químicos a energia liberada por uma explosão pode ser de origem química ou física. Exemplos de liberação violenta de energia física são as explosões de vaso devido a altas pressões e rupturas repentinas do casco causadas por fraturas, corrosão ou pelo fenômeno BLEVE. Certos tipos de reações químicas podem liberar energia suficiente para causar uma explosão. Uma explosão pode, por exemplo, ser causada por uma liberação violenta de energia num vaso devido à combustão de um gás inflamável ou pela decomposição de produtos de reação numa reação química descontrolada. Os danos provocados por explosões são devido ao impacto de mísseis e de ondas de choque. Ondas de choque geram sobrepressões que podem ferir pessoas e danificar equipamentos e edifícios. Mísseis são classificados como primários ou secundários. Mísseis primários são resultantes da fragmentação da contenção de modo que energia é transmitida aos fragmentos que se tornam mísseis. Mísseis secundários ocorrem devido à passagem da onda de choque e transmissão de parte de sua energia aos objetos encontrados em seu trajeto tornando-os mísseis. A figura 2.3.2 desenvolvida por Khan, F.I., Abbasi, S.A.^{4,5}, ilustra as principais etapas ligadas à análise do efeito dominó provocado por uma explosão.

FIGURA 2.3.1 - Efeito dominó desencadeado por um incêndio^{4,5}

FIGURA 2.3.2 - Efeito dominó desencadeado por uma explosão^{4,5}.

3.BREVE ANÁLISE DE ACIDENTES GRAVES OCORRIDOS EM INSTALAÇÕES QUÍMICAS

A ocorrência de acidentes graves nas décadas de 60, 70, 80 e 90 resultou em danos severos para trabalhadores, população circunvizinha, ao patrimônio e meio ambiente. Muitos desses acidentes estavam intimamente ligados à ocorrência do efeito dominó.

Sob o ponto de vista de uma empresa, os riscos de ocorrência do efeito dominó podem ser de natureza interna ou externa. Um acidente interno do tipo efeito dominó tem origem nas instalações da própria empresa, enquanto que acidentes externos são gerados por instalações de empresas vizinhas. A possibilidade de ocorrência do efeito dominó interno é de responsabilidade do sistema de gestão de segurança da empresa que precisa estar consciente desse problema. Entretanto, a ocorrência de efeitos dominó externos não é de sua competência.

A falta de conhecimento sobre os perigos de acidentes entre empresas e a inexistência de um plano de prevenção de acidentes graves levou, por exemplo, o Governo da União Européia a emitir a Diretiva 96/82/EC¹⁸ que obriga empresas classificadas como perigosas a trocarem informações sobre riscos de acidentes. Estados membros da Comunidade Européia devem garantir que informações adequadas sejam trocadas de maneira apropriada entre as empresas sob sua responsabilidade, para conscientizar os mesmos em considerar em suas políticas de segurança a natureza e extensão do perigo global de acidentes maiores, através de seus sistemas de gestão, relatórios de segurança e planos de emergência. As empresas envolvidas são obrigadas a trocar informações com plantas adjacentes sobre prevenção contra acidentes maiores, mas não serão forçadas a colaborar na melhoria da segurança além dos limites de propriedade. Do ponto de vista social e econômico prevenir acidentes externos maiores e o efeito dominó através da cooperação merece tal atenção. Grandes áreas industriais envolvendo plantas onde grandes quantidades de substâncias perigosas são produzidas, armazenadas ou processadas, aumentam o risco de um acidente desencadear outros acidentes maiores em plantas adjacentes (figura 3.1).

FIGURA 3.1 - Identificação das áreas de escopo perigosas para as empresas A e B

É essencial conhecer e aprender sobre acidentes passados para entender o mecanismo dos acidentes e desenvolver prevenções e estratégias de controle. Entretanto as indústrias são geralmente relutantes em revelar as causas da ocorrência de um acidente e mostram uma tendência em minimizar seus erros. Os autores Khan & Abbasi¹⁹ pesquisaram alguns dos maiores acidentes ocorridos em indústrias de processos químicos no período de 1926 a 1997 (as tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam um resumo dos casos investigados). Esses casos foram selecionados com o intuito de entender o potencial de danos dos vários tipos de acidentes e as causas comuns ou erros que levaram ao desastre. A análise dos diferentes tipos de eventos acidentais como incêndios, explosões e liberações tóxicas foi executada com o objetivo de avaliar o potencial de danos desses eventos. Nem todos os acidentes analisados foram seguidos da ocorrência do efeito dominó, porém os acidentes primários poderiam ter sido os mesmos.

Os maiores perigos da indústria de processos químicos são incêndios, explosões e liberações tóxicas. Incêndios são os eventos mais comuns, mas as explosões representam os acidentes mais significantes em termos de potencial de danos e levam sempre a fatalidades e importantes danos para a propriedade. As liberações tóxicas apresentam o maior potencial de morte para as pessoas e provocam a contaminação de áreas por meses ou mesmo anos. As liberações tóxicas são raras, mas podem ter taxas altas de mortalidade.

Mais de 60% das perdas oriundas de acidentes ocorridos em indústrias de processos químicos são provocadas por explosões. Cerca de 75% envolvem combustão ou materiais explosivos. Incêndios contribuem com cerca de 20% do total das perdas.

Os acidentes com produtos químicos perigosos podem ocorrer em instalações fixas ou durante o transporte. Dos 3224 acidentes graves investigados por Khan & Abbasi, envolvendo processamento, manipulação, estocagem e transporte de produtos químicos, 54% ocorreram em instalações fixas, 41% durante o transporte e outros 5% em outras situações (figura 3.2). Com relação ao transporte, 37% está relacionado ao transporte ferroviário, 32% ao transporte rodoviário, 20% a oleodutos e gasodutos, 6% a transporte marítimo e 5% a transporte fluvial (figura 3.3).

TABELA 3.1 – Causas principais de incêndios nas indústrias químicas¹⁹

Causas	Proporção (%)
Líquido inflamável ou gás (liberação, transbordo)	17,8
Sobreaquecimento, superfícies quentes, etc.	15,6
Falha em tubulações e acessórios	11,1
Colapso elétrico	11,1
Soldagem e corte	11,1
Incêndio criminoso	4,4
Outros	28,7

Fontes: Norstrom (1982)

TABELA 3.2 – Causas principais de explosões nas indústrias químicas¹⁹

	Proporção (%)
<i>Principais causas</i>	
Reação química descontrolada	20,0
Reação química acidental	15,0
Combustão e explosão em equipamento	13,3
Nuvem de vapor não confinada	10,0
Sobrepresão	8,3
Decomposição química	5,0
Faísca, centelha	5,0
Falha em vasos de pressão	3,3
Operações indevidas	3,3
Outros	16,8
<i>Locais de ocorrência mais frequentes</i>	
Processos confinados ou edifícios de produção	46,7
Estruturas externas	31,7
Pátios	6,7
Áreas de estocagem	3,3
Casa de caldeiras	3,3
Outros	8,3
<i>Fatores contribuintes</i>	
Ruptura de equipamento	26,7
Elemento humano	18,3
Procedimentos impróprios	18,3
Falha de projeto	11,7
Atmosfera carregada de vapor	11,7
Congestionamento de equipamentos	11,7
Líquidos inflamáveis	8,3
Tempo de substituição de peça/equipamento muito longo	6,7
Controle de combustão inadequado	5,0
Alívio de pressão inadequado	5,0

Fontes: Lees (1996)

TABELA 3.3 – Liberações acidentais em vasos de processo e tubulações¹⁹

	Nº. de Incidentes
<i>Tipo de Instalação</i>	
Planta Química	278
Refinaria	96
Unidade fabril	187
Armazém	47
Área de tancagem	28
Posto de combustível	15
Outros	38
Desconhecido	232
Total	921
<i>Situações</i>	
Operações normais	343
Estocagem	103
Carga / Descarga	33
Manutenção	146
Modificações	8
Serviço contratado	18
Testes	5
Desconhecido	128
Outras	40
Partida	42
Parada	18
Total	884
<i>Substâncias liberadas</i>	
Amônia	54
Hidrocarbonetos (não especificados)	54
Cloro	50
Hidrogênio	37
Benzeno	33
Petróleo bruto	28
Vapor d'água	25
Gás natural	24
Propano	20
Butano	18
Óleo combustível	18
Ácido clorídrico	16
Ácido sulfúrico	16
Etileno	16
Sulfeto de hidrogênio	14
Água	13
Nitrogênio	13
Oxigênio	13
Cloreto de vinil	12
GLP	12
Estireno	11
Nafta	10
Total	507

TABELA 3.3 Liberações acidentais em vasos de processo e tubulações¹⁹ (continuação)

<i>Fase da substância</i>	
Líquido	393
Gás	260
Vapor	13
Sólido	9
Líquido + gás/vapor	120
Sólido + gás/vapor	3
Total	798
<i>Substância dispersa sem ignição</i>	
Inflamável	127
Tóxico	123
Inflamável / Tóxico	47
Corrosivo	97
Irritante	1
Gás	96
Nuvem de vapor	180
Líquido	212
Derramamento	186
Jato / esguicho	8
Spray	10
Total	1087
Incêndio	145
“Flash fire”	11
Incêndio de poça	4
Jato de fogo	1
Bola de fogo	7
BLEVE	4
Explosão	63
Explosão seguida de incêndio	77
Explosão seguida de “flash fire”	2
Total	314

Fontes: Bellamy et al. (1989); Lees (1996)

FIGURA 3.2 – Classificação dos acidentes (nº de acidentes)¹⁹

FIGURA 3.3 – Classificação dos acidentes em transportes (nº de acidentes)¹⁹

Marshall e Lees²⁰ mostraram que muitos acidentes, considerados graves, estão intimamente associados à ocorrência do efeito dominó (tabela 3.4).

O BARPI (**B**ureau d'**A**nalyse des **R**isques et **P**ollutions **I**ndustrielles) e o Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, publicou em 2001 na França pelo INERIS¹³ (**I**nstitut **N**ational de l'**E**nvironnement Industriel et des **RIS**ques), um estudo de acidentes intitulado “Étude type sur les effets dominos”. Esse estudo consiste em uma análise técnica de 114 casos de acidentes industriais envolvendo o Efeito Dominó. Os acidentes selecionados envolvem essencialmente indústrias químicas, refinarias de petróleo, indústrias farmacêuticas, instalações de produção e distribuição de combustíveis gasosos, indústrias de papel e celulose, indústrias de tintas e vernizes, indústrias alimentícias, indústrias metalúrgicas, transporte rodoviário, ferroviário, fluvial e marítimo. Esse estudo, mesmo centrado em relativamente poucos eventos acidentais, forneceu informações importantes sobre a propagação de acidentes.

Os eventos investigados pelo BARPI incluem acidentes com tanques de hidrocarbonetos, amônia e outras substâncias, tubulações, reatores químicos, estocagens a granel, ocorridos em plantas fixas ou durante transportes rodoviários, ferroviários ou marítimos. Um resumo desses eventos e suas conseqüências é apresentado nas tabelas 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11.

Com relação à propagação dos eventos acidentais, o estudo do BARPI mostra que 94% dos eventos investigados, apresentam uma ou no máximo duas etapas de propagação na seqüência de eventos, conforme mostra a figura 3.4.

Esse mesmo estudo mostra que os iniciadores podem ser vários, havendo uma predominância de incêndios em tanques de estocagem (24%), explosões de nuvem de vapor (23%) e jatos de fogo (12%), conforme mostra a figura 3.5.

Com relação à propagação aos eventos secundários, o mesmo estudo mostra a ocorrência de uma predominância de incêndios (42%), de explosões de nuvem de vapor (8%) e de dispersões de nuvem tóxica (7%), conforme mostra a figura 3.6.

A ocorrência de eventos terciários é ilustrada pela figura 3.7. Cerca de 70% desses eventos são constituídos por explosões de nuvem, de incêndios e BLEVEs.

TABELA 3.4 – Principais acidentes envolvendo Efeito Dominó²⁰

Localização	Substância	Data	Fatalidades	Feridos
Texas City, USA	Nitrato de Amônia	abril, 1947	552	3000
Nigata, Japão	Gás natural	junho, 1964	3	-
Feyzin, França	Propano	janeiro, 1966	18	81
Texas City, USA	Butadieno	outubro, 1969	13	5
Crescent City, USA	Gás liquefeito de Petróleo (GLP)	Junho, 1970	0	66
Beek, The Netherlands	Nafta	novembro, 1975	14	104
Westwego, USA	Grãos	dezembro, 1977	36	10
Texas City, USA	Gás liquefeito de Petróleo (GLP)	novembro, 1978	7	10
Borger, USA	Hidrocarbonetos leves	janeiro, 1980	0	41
Livingston, USA	Petroquímicos	setembro, 1982	nd	nd
México City, Mexico	Gás liquefeito de Petróleo (GLP)	novembro, 1984	500	6400
Antwerp, Belgium	Óxido de Etileno	julho, 1987	nd	nd
Antwerp, Belgium	Óxido de Etileno	março, 1989	2	5
Pasadena, USA	Isobutano	outubro, 1989	23	130
Nagothane, Índia	Etano e Propano	novembro, 1990	31	63
Bradford, UK	AZDN	julho, 1992	nd	nd
Vishakhapatnam, Índia	Gás liquefeito de Petróleo (GLP)	setembro, 1997	60	-
nd – não disponível		Fontes: Marshall (1987); Lees (1996)		

TABELA 3.5 – Acidentes envolvendo tanques de hidrocarbonetos¹³

Nº de acidente recenseados: 9			
	Nº de casos	Propagação	Consequências
Ocorrências de incêndios	4	sim	1 caso de incêndio no tanque e na bacia de contenção; vários danos em outros tanques, outras instalações e edifícios próximos.
Ocorrências de explosões	5 (explosões de tanque)	sim	Destruição por mísseis de uma bacia de contenção e 2 casos de danos à tubulação; vários danos em outros tanques, edifícios e veículos

TABELA 3.6 – Acidentes envolvendo outros tanques de estocagem¹³

Nº de acidente recenseados: 9			
	Nº de casos	Propagação	Consequências
Ocorrências de incêndios	1	sim	Incêndios em outros tanques próximos
Ocorrências de explosões	6 (explosões de nuvem de vapor)	sim	4 casos de BLEVE em esferas (propano, CO2 líquido, butano, isobutano ...), 2 casos de explosões físicas e 2 casos de queda de tanques com rompimento de tubulações e derramamento de produtos químicos.

TABELA 3.7 – Acidentes envolvendo tubulações¹³

Nº de acidente recenseados: 17			
	Nº de casos	Propagação	Consequências
Ocorrências de incêndios	1 caso de jato de fogo	sim	Danos em tubulações e equipamentos próximos; 1 caso de incêndio de uma tubulação de GLP seguido de um BLEVE do tanque interligado com projeções de fragmentos; 2 casos de ruptura de tubulação
	5		Danos em tanques e tubulações próximas seguidas de explosões de nuvem de vapor e projeções de fragmentos.
Ocorrências de explosões	1 (explosão de tubulação enterrada de gás natural)	sim	Incêndio de tubulações e tanques de estocagem de metanol e glicol respectivamente.

TABELA 3.8 – Acidentes envolvendo estocagem a granel interna ou externa¹³

Nº de acidente recenseados: 20			
	Nº de casos	Propagação	Conseqüências
Ocorrências de incêndios	15	sim	Incêndios em instalações vizinhas; 3 casos de explosões de material estocado nos paletes.

TABELA 3.9 – Acidentes envolvendo reatores químicos¹³

Nº de acidente recenseados: 6			
	Nº de casos	Propagação	Conseqüências
Ocorrências de incêndios e explosões	6 (reações químicas descontroladas)	sim	Incêndios e explosões em tubulações e equipamentos próximos com projeções de fragmentos

TABELA 3.10 – Acidentes envolvendo instalações contendo amônia¹³

Nº de acidente recenseados: 7			
	Nº de casos	Propagação	Conseqüências
Ocorrências de incêndios	3	sim	3 casos de explosões em unidades de refrigeração utilizando amônia; 2 casos de incêndios e explosões em tanques de estocagem com projeções de fragmentos.

TABELA 3.11 – Acidentes ocorridos durante o transporte¹³

Nº de acidente recenseados: 7			
Tipo de transporte	Nº de casos	Propagação	Consequências
Ferroviário	3 (descarrilamento com perfuração de tanque)	sim	BLEVE em outros vagões com projeções de fragmentos (1 caso com vagões de explosivos; 1 caso com vagões de gasolina; 1 caso com incêndio num vagão de GLP seguido de BLEVE no comboio todo e incêndios nos edifícios próximos).
Rodoviário	3	sim	1 caso de incêndio de um caminhão de botijões de gás com explosões dos botijões e projeções de fragmentos; 1 caso de incêndio da unidade de refrigeração do caminhão seguida de propagação do fogo para os demais caminhões numa plataforma logística e incêndio do depósito; 1 caso de explosão de vapores de solvente de um caminhão tanque devido ao sobreenchimento seguido de incêndio e propagação do fogo para os tanques de estocagem vizinhos.
Marítimo	2	sim	2 casos em navios carregando nitrato de amônia com projeções de fragmentos.

FIGURA 3.4 – Propagação de eventos acidentais.¹³

FIGURA 3.5 – Eventos iniciadores (eventos primários)¹³

FIGURA 3.6 – Eventos secundários.¹³

FIGURA 3.7 – Eventos terciários.¹³

4. O EFEITO DOMINÓ NA ANALISE QUANTITATIVA DE RISCOS

4.1 Objetivo da Análise Quantitativa de Riscos (AQR)

A Análise Quantitativa de Riscos (AQR) de uma instalação industrial química possibilita avaliar quantitativamente os riscos da instalação, abrangendo desde os incidentes mais freqüentes de pouca severidade até os eventos acidentais mais raros, mas de maiores conseqüências. A AQR consiste em um conjunto de procedimentos para promover a combinação das freqüências e conseqüências de um acidente. Os resultados da AQR são avaliados através da comparação com critérios preestabelecidos de aceitação de riscos objetivando a tomada de decisão quanto ao gerenciamento dos riscos de uma instalação. O principal objetivo para a execução de uma AQR é, portanto, possibilitar a adoção de ações de gerenciamento adequadas, que tenham por finalidade prevenir, controlar ou reduzir os riscos existentes numa instalação industrial química.

4.2 Metodologia da Análise Quantitativa de Riscos

As principais etapas de uma Análise Quantitativa de Riscos e suas interligações podem ser ilustradas pelo fluxograma da figura 4.2.1. Cada uma dessas etapas é descrita sucintamente a seguir:

- Caracterização do empreendimento

Esta etapa tem por finalidade definir o sistema que será objeto da avaliação de risco e coletar informações relevantes ao estudo. As principais informações que devem ser coletadas compreendem as características da região onde se localiza o empreendimento e características da própria instalação. São necessárias informações do tipo: distribuição populacional; características meteorológicas locais; topografia da região etc. No que se refere à instalação são coletadas informações sobre as premissas do projeto, especificações técnicas, substâncias envolvidas nos processos etc.

- Identificação dos perigos e definição de cenários acidentais

O objetivo desta etapa é identificar possíveis eventos acidentais que podem levar a materialização de um perigo. Essa identificação é realizada através da utilização de técnicas de identificação de perigos dentre as quais se destacam:

- Listas de verificação (Checklist's), aplicada na identificação de desvios em relação às boas práticas e de perigos genéricos;

- Análise Preliminar de Perigos (APP), aplicada na identificação de perigos genéricos e proposta de medidas mitigadoras;
- Análise de Modos de Falhas e Efeitos (AMFE), aplicada na identificação de eventos iniciadores;
- Análise de Perigos e Operabilidade (HazOp – Hazard and Operability Study), aplicada na identificação de eventos iniciadores e proposta de medidas mitigadoras;
- Análise “E se ...” (What if ...?), aplicada na identificação de desvios em relação às boas práticas e na identificação de eventos iniciadores.

- Estimativa das conseqüências e das vulnerabilidades

Cada cenário identificado na etapa anterior da AQR deverá ser estudado quanto as possíveis conseqüências, mensurando-se todos os impactos e danos causados em pessoas, equipamentos, edifícios e meio ambiente.

A análise de conseqüências utiliza-se de modelos de cálculos que avaliam os possíveis efeitos decorrentes de radiações térmicas de incêndios; sobrepressões e projeções de fragmentos causadas por explosões; e concentrações tóxicas geradas por emissões e dispersões de gases e vapores. As etapas dessa análise envolvem: caracterização das fontes de material e/ou de energia; avaliação do transporte desse material e/ou energia através de modelos e correlações; e identificação dos efeitos dessa propagação e mensuração dos impactos causados à segurança e ao meio ambiente.

- Estimativa das freqüências

Esta etapa envolve a estimativa da freqüência de ocorrência de cada cenário acidental identificado na etapa anterior. Essas estimativas podem ser feitas através da extrapolação de dados históricos de acidentes, através de pesquisas bibliográficas ou bancos de dados de acidentes ou utilizando técnicas e métodos para cálculos de freqüências tais como:

- Análise de Árvore de Falhas (AAF) que apresenta de forma sistemática, todos os cenários acidentais passíveis de ocorrer como conseqüência de um evento iniciador considerando-se varias possibilidades de evolução do acidente deflagrado pelo evento iniciador; e
- Análise de Árvore de Eventos (AAE) que consiste num diagrama lógico montado através de um processo dedutivo a partir de um evento indesejado pré-definido (geralmente um modo de falha do sistema em estudo) e em busca das causas possíveis desse evento.

FIGURA 4.2.1 – Etapas de um estudo da Análise Quantitativa de Riscos

- Estimativa do Risco

O risco de um acidente é caracterizado quantitativamente através da combinação das frequências de ocorrência dos cenários acidentais e de suas respectivas consequências, conforme:

$$\text{RISCO} \equiv f(\text{Cenário}, \text{Frequência}, \text{Consequência})$$

Os riscos decorrentes de acidentes em instalações industriais podem ser expressos de diversas formas conforme o objetivo do estudo. As formas mais utilizadas definem índices de risco e avaliam os riscos individuais e coletivos.

- Avaliação e gerenciamento de riscos

Os riscos estimados na etapa anterior devem ser avaliados tendo em vista a definição das medidas e procedimentos a serem implementadas para a redução e/ou gerenciamento dos mesmos. Os riscos são comparados com critérios de tolerabilidade previamente estabelecidos. Caso os riscos sejam considerados inaceitáveis, devem ser implementadas medidas de redução desses riscos e uma nova AQR deverá ser executada.

- O efeito dominó na Análise Quantitativa de Riscos

A consideração do efeito dominó num estudo de perigos permite identificar os cenários acidentais suscetíveis de gerar uma propagação do evento sobre a planta ou sobre plantas vizinhas e justificar a implantação de medidas específicas para evitar essa propagação. Permite também verificar a existência de níveis aceitáveis de segurança em áreas importantes da instalação (sala de controle, instalações de combate a incêndios etc).

A análise do efeito dominó pode constituir-se numa tarefa complexa pois a planta pode vir a ser um alvo potencial de agressões externas ou ser uma fonte de agressão em plantas vizinhas como ilustrado nas figuras 4.2.2 e 4.2.3.

Normas técnicas e legislações preocupadas com o controle do perigo de acidentes graves sempre incluem medidas para a avaliação, controle e prevenção de efeitos dominó. Varias normas técnicas introduziram tais medidas na forma de distâncias de segurança, isolamento térmico ou inundação com água, para controlar ou reduzir a probabilidade de eventos devidos ao efeito dominó. A legislação europeia requer a avaliação de perigos relacionado ao efeito dominó desde a primeira Diretiva “Seveso” (Directive 82/501/EEC)²¹, que foi adotada em 1982. A Diretiva da Comunidade Europeia “Seveso II” (Directive 96/82/EC)¹⁸ requer a avaliação do perigo de acidentes para efeito dominó dentro e fora de sítios industriais.

FIGURA 4.2.2 – Efeitos Dominó internos e externos

FIGURA 4.2.3 – Exame do efeito dominó numa análise de riscos

A implantação de diretivas nacionais na Comunidade Européia requer uma análise quantitativa de risco abrangente de áreas onde altas concentrações de sítios industriais estão presentes, a fim de avaliar os perigos potenciais devidos à interação de múltiplas fontes de risco numa área restrita.

Apesar da atenção relevante na legislação dedicada a avaliação e prevenção do efeito dominó, não se dispõe, até o momento, de uma metodologia geral, e de critérios para a avaliação do efeito dominó. Vários estudos pioneiros envolveram principalmente metodologias qualitativas de avaliação do efeito dominó^{10,12,14,22}. Contribuições importantes se dedicaram a apenas alguns aspectos do problema^{10,12,23} (por exemplo a estimativa da frequência do efeito dominó, a estimativa determinística do efeito dominó devido a radiação térmica^{24,25}, modelos para a propagação de acidentes^{14,4,7}). Poucos autores propuseram metodologias abrangentes, adequadas para a análise de arranjos físicos complexos de instalações industriais. Muitas dessas metodologias foram forçadas a excessivas simplificações ou hipóteses simplificadoras indevidas, devido principalmente às limitações por falta de recursos computacionais disponíveis na época. Em consequência, a avaliação quantitativa de risco de acidentes devido ao efeito dominó não é normalmente executada em relatórios de segurança, e a avaliação do perigo do efeito dominó é limitada a detalhes e análises determinísticas de alguns casos representativos.

4.3 A Metodologia ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the context of the Seveso II Directive)

A metodologia ARAMIS permite avaliar o nível de risco de uma planta industrial levando-se em consideração as medidas de prevenção tomadas contra acidentes graves. São gerados índices de risco baseados em cenários de referência, na severidade das consequências, na eficiência da gestão de segurança e na vulnerabilidade do meio ambiente. Essa metodologia está em harmonia com a implantação da diretiva SEVESO II.

A identificação dos possíveis cenários de acidentes constitui o ponto chave da análise de riscos de uma indústria de processo. Entretanto, numa abordagem determinística, apenas são considerados na análise os piores casos de cenários sem levar em conta os dispositivos de segurança em uso e a política de segurança em vigor. Essa abordagem pode levar a não implantação de sistemas de segurança.

A metodologia ARAMIS aborda essas questões de forma sistemática, podendo ser dividida em quatro etapas principais:

1. Definição dos cenários de referência

- identificação de perigos dos acidentes graves (PAG)
- definição dos sistemas de segurança; e
- definição dos cenários acidentais de referência (CAR).

2. Avaliação da eficiência da gestão de segurança.

3. Mapeamento da severidade do risco associado ao conjunto de cenários acidentais de referência.

4. Mapeamento da vulnerabilidade representando a sensibilidade do ambiente circundante da planta.

- Metodologia para a Identificação do Perigo de Acidentes Graves (MIPAG)

Um acidente grave é um evento maior tal como uma emissão seguida de um incêndio ou uma explosão de grandes proporções, resultante do desenvolvimento descontrolado de eventos durante o funcionamento de uma planta e que provoque um grande perigo, imediato ou retardado, para as pessoas e instalações, internas e externas à empresa. Na metodologia proposta, o termo “perigo de acidente grave” deve ser interpretado como associado ao pior cenário de acidente, supondo a ausência ou ineficiência do sistema de segurança (levando inclusive em conta o sistema de gestão da segurança).

O método de identificação de acidentes graves é baseado principalmente no uso de diagrama tipo gravata borboleta, que é a combinação de uma árvore de falha e de uma árvore do evento para um evento crítico, num equipamento contendo uma substância perigosa.

O método MIPAG oferece, numa primeira etapa, uma metodologia abrangente de coleta de informações necessárias para a identificação dos equipamentos de uma planta considerados potencialmente perigosos, e de selecionar, entre eles, os equipamentos relevantes realmente capazes de gerar acidentes graves. Num segundo passo, é gerada uma lista de eventos críticos potenciais associados aos equipamentos relevantes selecionados anteriormente. Para cada evento crítico são construídas árvores de falhas e de eventos baseadas em modelos de árvores genéricas oferecidas pelo método. O conjunto constituído por uma árvore de falha e uma árvore de evento constitui o que se denomina de diagrama do tipo gravata borboleta.

É importante salientar que nesta etapa da metodologia nenhuma barreira de segurança é considerada. Esta primeira parte da metodologia ARAMIS permite a identificação de perigos. A etapa seguinte identifica os riscos resultantes dos cenários perigosos e da falha das barreiras de segurança.

- Avaliação da eficiência da gestão de segurança versus a confiabilidade da barreira de segurança

A gestão tem uma enorme influência na capacidade de controle dos riscos industriais. O objetivo da metodologia ARAMIS é de oferecer ferramentas que ajudam a avaliar o sistema de gestão da segurança e a cultura de segurança associada, e levá-las tanto as instâncias superiores como ao operador da planta com o intuito de ajudar a definir as características do sistema de gestão da segurança em questão.

- Metodologia para a Identificação de Cenários de Acidentes de Referência (MICAR)

Uma vez identificados os acidentes graves (etapa MIPAG) e avaliadas as barreiras de segurança serão avaliadas suas consequências. O objetivo da presente etapa (MICAR) é de identificar os cenários de acidentes de referência (CAR) que serão levados em consideração posteriormente no cálculo de um índice de severidade que basicamente mede a influência dos perigos ou risco de um sistema. O princípio se baseia em considerar somente os cenários de acidentes graves correspondentes a fenômenos perigosos com uma frequência e/ou consequências que podem ter efeitos sobre o índice supracitado.

- Avaliação e mapeamento da severidade

Uma vez identificados os acidentes de referência (etapa MICAR) a metodologia avalia a severidade destes cenários e propõe a construção de mapas de severidade cruzando os efeitos de um acidente e a vulnerabilidade dos ambientes vizinhos.

- Avaliação da vulnerabilidade

Um índice de vulnerabilidade combinando diferentes tipos de alvos como pessoas, meio ambiente, equipamentos e edifícios, é então avaliado.

- A identificação e avaliação quantitativa de acidentes causados por efeito dominó e a metodologia ARAMIS

O presente trabalho leva em conta somente a etapa MIPAG da metodologia ARAMIS para a identificação dos cenários graves capazes de desencadear o efeito dominó, pelo fato de o fenômeno estudado estar associado ao pior acidente sem atuação das barreiras de segurança.

Detalhes dos procedimentos empregados na etapa MIPAG estão descritos no capítulo 5 - Metodologia para a análise do efeito dominó.

5. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DO EFEITO DOMINO

5.1 Definição do efeito dominó

Neste trabalho o efeito dominó será tratado como um acidente no qual um evento acidental primário ocorrido num equipamento primário propaga-se para equipamentos próximos, desencadeando um ou mais eventos acidentais secundários resultando em consequências em geral mais graves que as do evento acidental primário. Três elementos caracterizam o efeito dominó: um cenário acidental primário, que desencadeia o efeito dominó; um efeito de propagação a partir do evento acidental primário, via vetores de propagação; um ou mais cenários acidentais secundários e um ou mais cenários terciários.

O presente estudo se limitará aos eventos acidentais secundários. Dados históricos (vide Capítulo 3) revelam que apenas 5% dos acidentes industriais em plantas químicas envolvendo o efeito dominó resultaram em ocorrência de eventos acidentais terciários e em apenas 1% dos acidentes foi detectado a existência de eventos acidentais de maior ordem.

Os vetores de propagação estão ligados à radiação térmica originado por incêndios, à sobrepressão e à projeção e impacto de fragmentos resultantes de explosões. Liberações tóxicas são consideradas por alguns autores^{4,5} como causas de efeito dominó, mas somente devidas à inexistência de ou falhas no plano de emergência estabelecido pela empresa. Essas anomalias poderiam impedir o retorno seguro da planta ao seu funcionamento normal tendo como consequência o descontrole e o surgimento de novos acidentes.

A metodologia para a avaliação do efeito dominó pode ser dividida em quatro etapas principais: (1) identificação dos eventos acidentais primários; (2) identificação dos eventos acidentais secundários; (3) cálculo das consequências e frequências dos eventos acidentais secundários e 4) cálculo das consequências e frequências dos eventos acidentais secundários.

5.2 Identificação dos eventos acidentais primários

Nesta etapa utiliza-se a metodologia MIPAG (definida no Capítulo 4 como Metodologia para a Identificação do Perigo de Acidentes Gravés) para identificar todos os possíveis cenários que podem resultar de um evento acidental. As etapas da MIPAG estão representadas na figura 5.2.1.

FIGURA 5.2.1 – Etapas Principais da MIPAG

A identificação de eventos acidentais primários envolve sete etapas principais:

Etapa 1: Coleta de informações;

Etapa 2: Identificação dos equipamentos potencialmente perigosos da planta;

Etapa 3: Seleção dos equipamentos perigosos relevantes;

Etapa 4: Associação de um evento crítico primário a cada equipamento selecionado;

Etapa 5: Construção de uma árvore de falhas para cada evento crítico primário;

Etapa 6: Construção de uma árvore de eventos para cada evento crítico primário; e

Etapa 7: Construção dos diagramas tipo “gravata borboleta” para cada equipamento selecionado.

Etapa 1 - Coleta de informações

Nesta etapa são coletadas as informações necessárias à compreensão e análise da instalação em estudo, incluindo dados gerais da planta e de seus equipamentos potencialmente perigosos. Os dados gerais compreendem o arranjo físico, uma breve descrição dos processos, dos equipamentos e tubulações, substâncias estocadas e manipuladas com suas propriedades e classificação. Neste trabalho utilizou-se a classificação de periculosidade adotada pelo European Commission_Major Accident Hazards Bureau__SEVESO II Directive²⁶. A tabela 5.2.1 resume algumas das principais classificações. No apêndice A – Classificação de substâncias perigosas, é apresentado a lista completa dessa classificação.

Quanto aos equipamentos, dados como dimensões, condições operacionais, substâncias estocadas etc, são informações importantes para a análise dos eventos acidentais.

Etapa 2 - Identificação dos equipamentos potencialmente perigosos da planta

O objetivo desta etapa é efetuar uma pré-seleção dos equipamentos potencialmente perigosos bem como das substâncias associadas a esses equipamentos. As informações coletadas nesta etapa serão utilizadas na Etapa 3 para a seleção final dos equipamentos que efetivamente serão analisados em detalhes.

A classificação de equipamentos usada no presente trabalho segue os critérios do ARAMIS User Guide²⁷. A tabela 5.2.2 apresenta essa classificação. O processo de identificação do equipamento e substância pode ser facilitado pela elaboração de tabelas

com as colunas indicando respectivamente o nome e o tipo do equipamento; a substância contida, sua classificação de risco e estado físico.

TABELA 5.2.1 - Categorias de substâncias perigosas²⁶

Categoria	Classificação do Risco
1. Muito tóxico	R26; R27; R28. Também em combinação com R39
2. Tóxico	R23; R24; R25. Também em combinação com R39
3. Oxidante	R7; R8; R9
4. Explosivo	R2
5. Explosivo	R3
6. Líquidos Inflamáveis	R10
7a. Líquidos Muito inflamáveis	R10, R11, R17, R30
7b. Líquidos Altamente inflamáveis	R11
9a. Perigosa para o meio ambiente	R50; R50/53
9b. Perigosa para o meio ambiente	R51/53
10a. Qualquer classificação: reage violentamente com a água	R14; R14/15
10b. Qualquer classificação: em contato com a água libera gás tóxico	R29

TABELA 5.2.2 - Tipos de equipamento²⁷

#	Tipo de equipamento
EQ1	Estocagem de material sólido
EQ2	Estocagem de sólidos em pequenas embalagens
EQ3	Estocagem de fluidos em pequenas embalagens
EQ4	Estocagem pressurizada
EQ5	Estocagem acolchoada
EQ6	Estocagem atmosférica
EQ7	Estocagem criogênica
EQ8	Equipamento de transporte pressurizado
EQ9	Equipamento de transporte atmosférico
EQ10	Tubulação
EQ11	Equipamento de processo intermediário integrado no processo
EQ12	Equipamento envolvido na separação física ou química de substâncias
EQ13	Equipamento envolvido em reações químicas
EQ14	Equipamento envolvido em produção e suprimento de energia
EQ15	Equipamento para acondicionamento ou empacotamento
EQ16	Outros equipamentos

As Etapas 1 e 2, essencialmente descritivas, permitem coletar, de modo eficaz, um conjunto de informações indispensáveis para o estudo do efeito dominó. Os procedimentos recomendáveis para essas etapas estão ilustradas na figura 5.2.2. Esses procedimentos compreendem:

Divisão da planta em seções

O recorte em seções da planta em estudo permite ao analista concentrar-se em partes limitadas da planta. Uma seção pode ser caracterizada como um conjunto coerente, separado das outras por fronteiras físicas como muros, divisórias ou espaços vazios como caminhos, vias de circulação, etc.

Eventualmente pode-se adotar a “função industrial” de cada seção como característica, diferenciando, por exemplo, as seções de estocagem das seções dedicadas à carga e descarga, as seções de processo, as seções de utilidades e outras.

Listagem dos equipamentos por seções

Uma vez identificada cada seção é conveniente relacionar todos os sistemas e equipamentos que a compõe. É importante não desprezar equipamentos que não contenham substâncias perigosas, pois estes podem constituir fontes potenciais de agressão para outros equipamentos ou instalações. Uma estocagem pressurizada de um gás inerte, por exemplo, pode ser uma fonte potencial de geração de mísseis, embora o gás não ofereça perigo de incêndios ou explosões.

Nesta etapa os equipamentos são agrupados em dois blocos principais. O primeiro considera os equipamentos causadores de acidentes podendo apresentar perigo para os equipamentos vizinhos. O segundo reúne os equipamentos cuja atuação é indispensável para a intervenção e volta segura de funcionamento das instalações.

Descrição das características de cada equipamento

Após a identificação dos equipamentos perigosos é feita uma relação dos principais itens necessários à execução da análise de riscos e avaliação de consequências. Essas informações dependem do tipo de equipamento considerado e abrangem: a natureza, periculosidade e quantidade de substâncias estocadas ou movimentadas; as condições de operação (pressão, temperatura, composição etc) em cada fase de funcionamento do processo (paradas, partidas, operações normais etc); os procedimentos operacionais e de segurança; e as barreiras de segurança (técnicas e operacionais) previstas para controlar os riscos do equipamento considerado.

FIGURA 5.2.2 - Procedimentos preliminares para a identificação de equipamentos perigosos.

Descrição do local

Para que se possa identificar todas as ameaças e avaliar as suas conseqüências é necessário que se conheça as características do local onde a planta está tais como o uso de ocupação do solo, as condições meteorológicas e geográficas, sismicidade do local presença de vias de comunicação, rios, ferrovias etc. É necessário também identificar as empresas situadas nas proximidades citando, se possível suas atividades, e se necessário, em função do potencial de perigo, a natureza dos equipamentos e substâncias presentes nessas plantas.

Etapa 3 - Seleção dos equipamentos perigosos relevantes

Cada equipamento selecionado na Etapa 2 será considerado como um equipamento perigoso relevante se a massa de substância perigosa contida no equipamento for maior que um valor M_b definido pela metodologia “ARAMIS” no ARAMIS User Guide²⁷ e calculado conforme expressões listadas na tabela 5.2.4. O valor de M_b depende das propriedades associadas à periculosidade da substância, do seu estado físico, de suas propriedades físico-químicas e de sua localização em relação aos outros equipamentos.

Nesta etapa são utilizados os seguintes critérios adicionais:

- 1) Se vários equipamentos estão próximos e interconectados entre si, considera-se a massa total presente no conjunto de equipamentos.
- 2) Equipamentos (como tubulações) cuja capacidade é menor que a do valor M_b , mas podendo liberar em dez minutos uma massa maior ou igual ao valor M_b , são também selecionados como equipamentos perigosos.
- 3) Equipamentos que contenham substâncias explosivas ou inflamáveis, com capacidade de armazenamento menor que M_b , devem ser incluídos na relação desde que: estejam situados a uma distância menor que 50 metros de um equipamento já selecionado; e armazenarem uma massa M maior que a massa M_c (definida de acordo com os critérios adotados pelo ARAMIS User Guide²⁷). O procedimento de avaliação de M_c é descrito na tabela 5.2.4. Nesse procedimento utiliza-se a massa de referência M_a (que também é proveniente do ARAMIS User Guide²⁷) cujos valores em função das propriedades das substâncias estão listados na tabela 5.2.3.
- 4) Equipamentos sujeitos a explosão física não são relacionados pelo critério de massa M_b . Entretanto eles devem ser levados em consideração durante a análise da árvore de falhas, pois podem causar um efeito dominó pela geração e projeção de mísseis podendo atingir equipamentos vizinhos.

TABELA 5.2.3: Massas de Referência Ma²⁷

Propriedades da substância	Massa de referência Ma (kg)		
	Sólido	Líquido	Gás
1. Muito tóxico	10.000	1.000	100
2. Tóxico	100.000	10.000	1.000
3. Oxidante	10.000	10.000	10.000
4. Explosivo (classificação R3)	10.000	10.000	-
5. Explosivo (outras classificações)	1.000	1.000	-
6. Inflamável	-	10.000	-
7. Altamente inflamável	-	10.000	-
8. Extremamente inflamável	-	10.000	1.000
9. Perigoso para o meio ambiente	100.000	10.000	1.000
10. Qualquer classificação não coberta pelas propriedades citadas acima em combinação com R14, R14/15, R29	1.000	10.000	-

TABELA 5.2.4 - Parâmetros do MIPAG²⁷

Parâmetro	Dependência	Características	Fórmula
Massa de Referência Ma (kg)	<ul style="list-style-type: none"> • Periculosidade da substância (inflamável, explosiva) 	-	Ver tabela 5.2.3
Coefficiente S₁	<ul style="list-style-type: none"> • Condições de operação e propriedades fisico-químicas 	<ul style="list-style-type: none"> • O coeficiente S₁ leva em conta a diferença entre a temperatura de serviço T_s (°C) e a temperatura de ebulição a pressão atmosférica T_{eb} (°C) da substância contida. 	$S_1 = 10^{(T_s - T_{eb})/100}$
Coefficiente S₂	<ul style="list-style-type: none"> • Condições de operação e propriedades fisico-químicas 	<ul style="list-style-type: none"> • O coeficiente S₂ é aplicado somente quando a temperatura de serviço for menor que 0°C. • Para outros casos (temperaturas de serviço positivas), S₂ = 0. 	$S_2 = \frac{T_{eb}}{(-50)}$
Coefficiente S	<ul style="list-style-type: none"> • Condições de operação e propriedades fisico-químicas 	<ul style="list-style-type: none"> • S é a soma dos coeficientes S₁ e S₂ e S deve ser incluído no intervalo [0.1 – 10]. 	0,1 ≤ S ≤ 10 Se S < 0,1 então S = 0,1 Se S > 10 então S = 10
Massa Mb (kg)	<ul style="list-style-type: none"> • Periculosidade da substância (tóxica, inflamável, explosiva) • Condições de operação e propriedades fisico-químicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Para líquidos, a massa de referência definida na tabela citada acima deve ser dividida pelo coeficiente S. • Para substâncias não líquidas S = 1. 	$Mb = \frac{Ma}{S}$
Coefficiente S₃	<ul style="list-style-type: none"> • Posição do equipamento 	-	$\begin{cases} 0,1 \leq S_3 \leq 1 \\ S_3 = (0,02 \times D)^3 \end{cases}$ 0,1 ≤ S₃ ≤ 1 Se S₃ < 0,1 então S₃ = 0,1 Se S₃ > 1 então S₃ = 1
Massa Mc (kg)	<ul style="list-style-type: none"> • Posição do equipamento 	-	Mc = S₃ x Mb

Etapas 4 - Associação de um evento crítico primário a cada equipamento selecionado

Um Evento Crítico Primário (ECP) é definido como um evento acidental que causa a liberação de materiais perigosos de um sistema confinado (perda de contenção). Os principais tipos de ECP considerados no presente trabalho são:

- Vazamento: Furo no casco de um vaso ou pequeno furo numa tubulação curta com liberação do material contido na fase líquida ou gasosa;
- Vazamento em tubulações longas: Furo numa tubulação longa com liberação do material contido;
- Ruptura de Linha: Ruptura total de um comprimento curto de tubulação conectada ao vaso com liberação do material contido; e
- Ruptura Catastrófica: Liberação instantânea de todo o inventário de um vaso devido à destruição do casco pelo impacto de um objeto ou veículo, por uma brecha ou outra falha se propagando rapidamente.

A metodologia MIPAG prevê a elaboração de três matrizes para a identificação dos eventos críticos primários. A primeira matriz relaciona a interação entre os estados das substâncias e os equipamentos que as contêm (Matriz EST-EQ). A segunda matriz relaciona a interação entre o tipo de equipamento e o evento crítico primário (Matriz EQ-ECP). A terceira matriz relaciona o estado da substância e o evento crítico primário (Matriz EST-ECP). No presente trabalho essas três matrizes tomam a forma mostrada nas tabelas 5.2.5, 5.2.6 e 5.2.7.

Etapas 5 - Construção de uma árvore de falhas para cada evento crítico primário

As principais causas de um evento crítico primário podem ser identificadas através de uma árvore de falhas. A metodologia MIPAG propõe árvores de falhas associadas a 12 eventos críticos primários³¹. A tabela 5.2.8 mostra a associação Evento Crítico Primário – Árvore de Falhas Genérica para os 12 eventos propostos. A figura 5.2.3 apresenta um exemplo de árvore de falhas para um evento crítico primário do tipo “brecha ou furo no casco do lado líquido” (ECP7).

TABELA 5.2.5 - Matriz estado da substância (EST) – tipo de equipamento (EQ)²⁷

Sólido EST1	Líquido EST2	Bifásico EST3	Gás/Vapor EST4	
X				EQ1 Estocagem de massa sólida
X				EQ2 Estocagem de sólidos em pequenos acondicionamentos
	X	X	X	EQ3 Estocagem de fluidos em pequenos acondicionamentos
		X	X	EQ4 Estocagem pressurizada
	X			EQ5 Estocagem acolchoada
	X			EQ6 Estocagem atmosférica
	X	X		EQ7 Estocagem criogênica
		X	X	EQ8 Equipamento de transporte pressurizado
	X			EQ9 Equipamento de transporte atmosférico
	X	X	X	EQ10 Tubulações
X	X	X	X	EQ11 Equipamento de estocagem intermediário integrado ao processo
X	X	X	X	EQ12 Equipamento envolvendo a separação física de substâncias
X	X	X	X	EQ13 Equipamento envolvendo reações químicas
	X	X	X	EQ14 Equipamento projetado para a produção e suprimento de energia
X	X	X	X	EQ15 Equipamento para acondicionamento ou empacotamento
X	X	X	X	EQ16 Outros equipamentos

TABELA 5.2.6 - Matriz tipo de equipamento (EQ) – eventos críticos primários (ECP)²⁷

	ECP1 Decomposição química	ECP2 Explosão	ECP3 Materiais escoando (arrastados pelo ar)	ECP4 Materiais escoando (arrastados por um líquido)	ECP5 Início de incêndio (PIF)	ECP6 Brecha no casco na fase vapor	ECP7 Brecha no casco na fase líquida	ECP8 Vazamento líquido em tubulações	ECP9 Vazamento gasoso em tubulações	ECP10 Ruptura catastrófica	ECP11 Colapso do vaso	ECP12 Colapso do teto
EQ1 Estocagem de massa sólida	X	X	X	X	X							
EQ2 Estocagem de sólidos em pequenos acondicionamentos					X					X		
EQ3 Estocagem de fluidos em pequenos acondicionamentos					X	X	X			X		
EQ4 Estocagem pressurizada					X	X	X	X	X	X		
EQ5 Estocagem acolchoada					X		X	X		X	X	
EQ6 Estocagem atmosférica					X		X	X		X	X	X
EQ7 Estocagem criogênica (nota 3)					X	X	X	X	X	X	X	
EQ8 Equipamento de transporte pressurizado					X	X	X	X	X	X		
EQ9 Equipamento de transporte atmosférico					X		X	X		X	X	
EQ10 Tubulações					X			X	X			
EQ11 Equipamento de estocagem intermediário integrado ao processo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EQ12 Equipamento envolvendo a separação física de substâncias					X	X	X	X	X	X		
EQ13 Equipamento envolvendo reações químicas					X	X	X	X	X	X		
EQ14 Equipamento projetado para a produção e suprimento de energia					X	X	X	X	X	X		
EQ15 Equipamento para acondicionamento ao empacotamento			X	X	X			X	X			
EQ16 Outros equipamentos					X	X	X	X	X	X		

TABELA 5.2.7 - Matriz estado da substância (EST) / (ECP)²⁷

Sólido EST1 Líquido EST2 Bifásico EST3 Gás/Vapor EST4		ECP1 Decomposição química
		ECP2 Explosão
		ECP3 Materiais escoando (arrastados pelo ar)
		ECP4 Materiais escoando (arrastados por um líquido)
	X	ECP5 Início de incêndio (PIF)
	X	ECP6 Brecha no casco na fase vapor
	X	ECP7 Brecha no casco na fase líquida
	X	ECP8 Vazamento líquido em tubulações
	X	ECP9 Vazamento gasoso em tubulações
	X	ECP10 Ruptura catastrófica
		ECP11 Colapso do vaso
	X	ECP12 Colapso do teto

TABELA 5.2.8 - Lista de árvores de falhas genéricas propostas pelo MIPAG²⁷

	Evento Crítico	Árvore de Falhas Genérica	Características	
ECP1	Decomposição Química	AF Decomposição Química AF Decomposição ligada a uma fonte de ignição pontual AF Decomposição Térmica	■	
ECP2	Explosão	AF Explosão de um material explosivo AF Explosão (reação violenta)	■	
ECP3	Materiais escoando (arrastados pelo ar)	AF Materiais escoando (arrastados pelo ar)	■	
ECP4	Materiais escoando (arrastados por um líquido)	AF Materiais escoando (arrastados por um líquido)	■	
ECP5	Início de Incêndio (PIF)	AF Início de Incêndio (Perda de Integridade Física)	■	
ECP6	Furo no casco (fase vapor)	AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, grande AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, médio AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, pequeno	Furo grande	Diâmetro de 100 mm
			Furo médio	Diâmetro de 35 – 50 mm
			Furo pequeno	Diâmetro de 10 mm
ECP7	Furo no casco (fase líquida)	AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, grande AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, médio AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, pequeno	Furo grande	Diâmetro de 100 mm
			Furo médio	Diâmetro de 35 – 50 mm
			Furo pequeno	Diâmetro de 10 mm
ECP8	Vazamento líquido na tubulação	AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, grande AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, médio AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, pequeno	Vazamento grande	Ruptura total da tubulação
			Vazamento médio	Diâmetro de 22 – 44 % do diâmetro da tubulação
			Vazamento pequeno	Diâmetro de 10 % do diâmetro da tubulação
ECP9	Vazamento gasoso na tubulação	AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, grande AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, médio AF Furo no casco ou vazamento na tubulação, pequeno	Vazamento grande	Ruptura total da tubulação
			Vazamento médio	Diâmetro de 22 – 44 % do diâmetro da tubulação
			Vazamento pequeno	Diâmetro de 10 % do diâmetro da tubulação
ECP10	Ruptura Catastrófica	AF Ruptura Catastrófica	■	
ECP11	Colapso do vaso	AF Colapso do vaso	■	
ECP12	Colapso do teto	AF Colapso do teto	■

FIGURA 5.2.3 – Exemplo de Árvore de falhas – Furo no casco do vaso

Etapa 6 - Construção de uma árvore de eventos para cada evento crítico primário

As principais consequências de cada evento crítico primário podem ser identificadas através de uma árvore de eventos como exemplificado na figura 5.2.4 para um furo no casco de um tanque.

A construção de uma árvore de eventos requer a identificação dos eventos críticos secundário e terciário e do Fenômeno Perigoso. São eventos intermediários definidos pela metodologia MIPAG para auxiliar a construção da árvore de eventos.

Um Evento Crítico Secundário (ECS) resulta do Evento Crítico Primário (ECP). Os principais tipos de ECS analisados neste estudo são: formação de poça, formação de jato gasoso, e formação de jato bifásico. As associações possíveis entre Eventos Críticos Secundários (ECS), o Estado da Substância (EST) e Eventos Críticos Primários (ECP) são relacionadas numa matriz que cruza os ECP, EST e os ECS, como mostrado na tabela 5.2.9. Pelo cruzamento de informações nessa matriz é possível associar uma lista de Eventos Críticos Secundários para cada Evento Crítico Primário de acordo com o estado em que se encontra a substância manipulada ou estocada.

Um Evento Crítico Terciário (ECT) é definido um evento accidental originado pela ocorrência do Evento Crítico Secundário (ECS). Os principais tipos de ECT analisados neste estudo são: poça com ignição; poça sem ignição com dispersão atmosférica; jato gasoso com ignição; jato gasoso sem ignição com dispersão atmosférica, jato bifásico com ignição; e jato bifásico sem ignição com dispersão atmosférica. As associações possíveis entre Eventos Críticos Terciários (ECT) e Eventos Críticos Secundários (ECS) são expressas por uma matriz que cruza os ECS e os ECT, como mostrado na tabela 5.2.10. O cruzamento de informações nessa matriz permite a associação de Eventos Críticos Terciários para cada Evento Crítico Secundário selecionado.

Um Fenômeno Perigoso (FP) é definido como sendo um evento accidental conseqüente do Evento Crítico Terciário. Os principais tipos de FP analisados neste estudo são: incêndio de poça (Ipo); jato de fogo (JF); explosão de nuvem de vapor (ENV); incêndio de nuvem (“Flashfire”) (INV); BLEVE – Sobrepressão (BL); BLEVE – Bola de Fogo BLEVE (BF) e Projeção de Fragmentos (PF). As associações possíveis entre Eventos Críticos Terciário (ECT) e Fenômenos Perigosos (FP) são expressas por uma matriz que cruza os ECT e os FP, como mostrado na tabela 6.2.11. Pelo cruzamento de informações na tabela, é possível associar uma lista de Fenômenos Perigosos para cada Evento Crítico Terciário selecionado.

FIGURA 5.2.4 – Exemplo de Árvore de eventos – Furo no casco do vaso

TABELA 5.2.9 - Matriz ECP / EST / ECS

Evento Crítico Primário	Compatibilidade ECP-EST	Estado Físico		ECS1 Incêndio	ECS2 Ruptura catastrófica	ECS3 Formação de poça	ECS4 Poça dentro do tanque	ECS5 Jato gasoso	ECS6 Nuvem gasosa (Puff)	ECS7 Jato bifásico	ECS8 Nuvem tipo aerosol	ECS9 Explosão	ECS10 Materiais arrastados pelo ar	ECS11 Materiais arrastados por um líquido	ECS12 Decomposição
Decomposição química	ECP1	X	EST1 Sólido									X			X
			EST2 Líquido												
			EST3 Bifásico												
			EST4 Gás / Vapor												
Explosão	ECP2	X	EST1 Sólido									X			
			EST2 Líquido												
			EST3 Bifásico												
			EST4 Gás / Vapor												
Materiais escoando (arrastado pelo ar)	ECP3	X	EST1 Sólido										X		
			EST2 Líquido												
			EST3 Bifásico												
			EST4 Gás / Vapor												

TABELA 5.2.9 - Matriz ECP / EST / ECS (continuação)

Evento Crítico Primário	Compatibilidade ECP-EST	Estado Físico		ECS1 Incêndio	ECS2 Ruptura catastrófica	ECS3 Formação de poça	ECS4 Poça dentro do tanque	ECS5 Jato gasoso	ECS6 Nuvem gasosa (Puff)	ECS7 Jato bifásico	ECS8 Nuvem tipo aerosol	ECS9 Explosão	ECS10 Materiais arrastados pelo ar	ECS11 Materiais arrastados por um líquido	ECS12 Decomposição
Materiais escoando(arrastado por um líquido) ECP4	X	EST1	Sólido											X	
		EST2	Líquido												
		EST3	Bifásico												
		EST4	Gás / Vapor												
Início de incêndio (PIF) ECP5	X	EST1	Sólido	X											
	X	EST2	Líquido	X											
	X	EST3	Bifásico	X											
	X	EST4	Gás / Vapor	X											
Furo no casco do lado vapor ECP6	X	EST1	Sólido										X		
		EST2	Líquido												
	X	EST3	Bifásico					X							
	X	EST4	Gás / Vapor					X							

TABELA 5.2.9 - Matriz ECP / EST / ECS (continuação)

Evento Crítico Primário		Compatibilidade ECP-EST	Estado Físico		ECS1 Incêndio	ECS2 Ruptura catastrófica	ECS3 Formação de poça	ECS4 Poça dentro do tanque	ECS5 Jato gasoso	ECS6 Nuvem gasosa (Puff)	ECS7 Jato bifásico	ECS8 Nuvem tipo aerossol	ECS9 Explosão	ECS10 Materiais arrastados pelo ar	ECS11 Materiais arrastados por um líquido	ECS12 Decomposição	
Furo no casco do lado líquido	ECP7		EST1	Sólido													
		X	EST2	Líquido			X										
		X	EST3	Bifásico			X				X						
			EST4	Gás / Vapor													
Vazamento líquido numa tubulação	ECP8		EST1	Sólido													
		X	EST2	Líquido			X										
		X	EST3	Bifásico			X				X						
			EST4	Gás / Vapor													
Vazamento gasoso numa tubulação	ECP9	X	EST1	Sólido										X			
			EST2	Líquido													
		X	EST3	Bifásico					X								
		X	EST4	Gás / Vapor					X								

TABELA 5.2.9 - Matriz ECP / EST / ECS (continuação)

Evento Crítico Primário	Compatibilidade ECP-EST	Estado Físico		ECS1 Incêndio	ECS2 Ruptura catastrófica	ECS3 Formação de poça	ECS4 Poça dentro do tanque	ECS5 Jato gasoso	ECS6 Nuvem gasosa (Puff)	ECS7 Jato bifásico	ECS8 Nuvem tipo aerosol	ECS9 Explosão	ECS10 Materiais arrastados pelo ar	ECS11 Materiais arrastados por um líquido	ECS12 Decomposição
Ruptura catastrófica	ECP10	X	EST1 Sólido		X								X		
		X	EST2 Líquido		X	X									
		X	EST3 Bifásico		X	X					X				
		X	EST4 Gás / Vapor		X				X						
Colapso do vaso	ECP11		EST1 Sólido												
		X	EST2 Líquido			X									
			EST3 Bifásico												
			EST4 Gás / Vapor												
Colapso do teto	ECP12		EST1 Sólido												
		X	EST2 Líquido				X								
			EST3 Bifásico												
			EST4 Gás / Vapor												

TABELA 5.2.10 - Matriz ECS – ECT

Evento Crítico Secundário	Compatibilidade ECS - EST	ECT1 Incêndio	ECT2 Ruptura catastrófica	ECT3 Poça e ignição dentro do tanque	ECT4 Poça e ignição	ECT5 Dispersão gasosa	ECT6 Produtos secundários tóxicos	ECT7 Jato gasoso e ignição	ECT8 Nuvem gasosa e ignição	ECT9 Jato bifásico e ignição	ECT10 Nuvem tipo aerosol e ignição	ECT11 Poça sem ignição / Dispersão da poça	ECT12 Explosão	ECT13 Nuvem de pó e ignição	ECT14 Dispersão de pó
Incêndio	ECS1	X					X								
Ruptura catastrófica	ECS2		X												
Formação de poça	ECS3				X	X						X			
Poça dentro do tanque	ECS4			X		X									
Jato gasoso	ECS5					X		X							
Nuvem gasosa (Puff)	ECS6					X			X						
Jato bifásico	ECS7					X				X					
Nuvem tipo aerosol	ECS8					X					X				
Explosão	ECS9												X		
Materiais arrastados pelo ar	ECS10													X	X
Materiais arrastados por um líquido	ECS11											X			
Decomposição	ECS12						X								

TABELA 5.2.11 - Matriz ECT - FP

Evento Crítico Terciário		Fenômenos Perigosos												
		FP1 Incêndio de poça	FP2 Incêndio de tanque	FP3 Jato de fogo	FP4 Explosão de nuvem de vapor	FP5 Flashfire	FP6 Nuvem tóxica	FP7 Incêndio	FP8 Projeção de mísseis	FP9 Sobrepressão	FP10 Bola de fogo	FP11 Danos ambientais	FP12 Explosão de pó	FP13 “Boilover” e incêndio de poça
Incêndio	ECT1							X						
Ruptura catastrófica	ECT2								X	X				
Poça e ignição dentro do tanque	ECT3		X				X					X		X
Poça e ignição	ECT4	X					X					X		
Dispersão gasosa	ECT5				X	X	X					X		
Produtos secundários tóxicos	ECT6						X					X		
Jato gasoso e ignição	ECT7			X			X					X		
Nuvem gasosa e ignição	ECT8						X				X	X		
Jato bifásico e ignição	ECT9			X			X					X		
Nuvem tipo aerosol e ignição	ECT10						X				X	X		
Poça sem ignição / Dispersão do pó	ECT11											X		
Explosão Nuvem de pó e ignição	ECT12								X	X			X	
Dispersão de pó	ECT13						X					X		

Etapa 7 - Construção dos diagramas tipo “gravata borboleta” para cada equipamento

A ultima etapa da metodologia MIPAG termina pela construção do diagrama tipo “gravata borboleta” para cada equipamento selecionado. O diagrama é construído ligando-se um Evento Crítico Primário (ECP) as respectivas árvores de falhas e de eventos (figura 5.2.5). Cada diagrama do tipo gravata borboleta representa um acidente potencial do equipamento selecionado.

FIGURA 5.2.5 – Diagrama tipo “gravata borboleta”

5.3 Identificação dos eventos acidentais secundários

Esta etapa da análise tem por objetivo verificar a possibilidade de ocorrência de eventos acidentais secundários pela quantificação dos danos resultantes de eventos acidentais primários, caracterizados pelos fenômenos perigosos (eventos acidentais primários) associados a cada equipamento perigoso selecionado. Os principais passos desta etapa estão representados na figura 5.3.1.

São utilizados modelos para quantificar as conseqüências de incêndios e explosões e o alcance máximo de fragmentos. Modelos de vulnerabilidade convertem todos os resultados quantitativos de radiação térmica, sobrepressão e projeção de fragmentos em efeitos sobre equipamentos de processo e estruturas.

Para dar suporte ao estudo, no capítulo 6 (Estudo de caso, aplicação e resultados), utiliza-se o código computacional SAFETI®, disponível no Centro de Engenharia Nuclear do IPEN. Este código, de uso conhecido no setor da indústria química convencional, é apropriado para os objetivos da presente proposta de trabalho quanto ao estudo de plantas químicas do ciclo do combustível nuclear. As etapas de cálculos executadas pelo SAFETI® com seus respectivos cenários e modelos estão listados na tabela 5.3.1.

FIGURA 5.3.1 - Procedimento para a análise do efeito dominó

TABELA 5.3.1 - Etapas de cálculo do SAFETI®

Etapa		Cenários / Modelos
Descarga	O modelo de descarga do SAFETI® prevê a vazão e o estado da substância confinada na sua liberação para a atmosfera.	<ul style="list-style-type: none"> • Escoamentos líquidos, gasosos ou bifásicos • Substâncias puras ou misturas • Processos estacionários ou transientes • Liberações confinadas.
Dispersão	Os resultados dos cálculos da descarga combinados com informações meteorológicas são utilizados pelo modelo de dispersão atmosférica do SAFETI® . A nuvem ou pluma dispersa segue diversos passos todos devidamente modelados pelo programa.	<ul style="list-style-type: none"> • Formação de aerossol • Condensação no solo • Formação de poça • Vaporização de poça • Arraste pelo ar e dispersão de nuvem • Aterrissagem e/ou decolagem da nuvem • Nuvens densas • Nuvens flutuantes.
Inflamabilidade	Os possíveis eventos que podem ocorrer com substâncias inflamáveis são modelados pelo SAFETI® e os resultados representados na forma de: <ul style="list-style-type: none"> • Níveis de radiação • Zonas de “Flashfire” • Níveis de sobrepressão 	<ul style="list-style-type: none"> • BLEVEs e bolas de fogo • Jatos de fogo • Incêndios de poça • “Flashfires” • Explosões de nuvens de vapor.
Toxicidade	Eventos tóxicos são calculados pelo SAFETI® .	<ul style="list-style-type: none"> • Concentração vs distância na direção do vento • Concentração vs tempo (em qualquer ponto da nuvem) • Comportamento das concentrações em ambientes confinados • Valores de Probit e cargas tóxicas em nuvens
Risco	As consequências calculadas pelo SAFETI® são combinadas com frequências de ocorrência.	<ul style="list-style-type: none"> • Contornos de risco individual • Curvas de risco social.

5.4 Vetores de Propagação e Valores Limites de Danos

O procedimento para identificar a possível ocorrência do efeito dominó, utiliza o conceito de vetor de propagação. Os efeitos de propagação que seguem a ocorrência de eventos acidentais primários são devidos à ação desses vetores sobre alvos secundários. Os vetores de propagação responsáveis pelo efeito dominó analisados no presente trabalho são a sobrepressão, a radiação térmica, a projeção e impacto de fragmentos.

Para quantificar a ação desses vetores considera-se o parâmetro “Valor Limite de Danos (VLD)” proposto por *V. Cozzani e E. Salzano*¹⁰. O VLD corresponde a um nível de exposição a um efeito físico abaixo do qual um efeito adverso não é esperado. Para cada vetor de propagação considerado na análise define-se um VLD.

1) Valor Limite de Danos por sobrepressão

*V. Cozzani e E. Salzano*¹⁰ desenvolveram 3 valores limites de danos para sobrepressão. A classificação inclui vaso atmosférico; vaso pressurizado; vaso alongado (vasos atmosféricos, alongados e verticais); e equipamento auxiliar (bombas, compressores, trocadores de calor, reatores de volume pequeno).

São definidas duas classes de estado de danos (ED1 e ED2). A classe ED1 considera pequenos danos na estrutura ou equipamento auxiliar, enquanto que a classe ED2 está ligada a danos catastróficos ou colapso total de uma estrutura. São definidas três categorias de intensidade de perda (IP1, IP2 e IP3). A categoria IP1 considera perdas menores, definidas como sendo perdas parciais do inventário ou perdas totais do mesmo num intervalo de tempo superior a 10 min após o impacto da onda de choque. A categoria IP2 considera perdas intensas, definidas como sendo perdas totais do inventário num intervalo de tempo entre 1 e 10 min, enquanto que a categoria IP3 corresponde a perdas catastróficas definidas como sendo perdas totais e “instantâneas” do inventário (ou perdas completas do inventário num intervalo de tempo inferior a 1 min após o impacto da onda de choque, do míssil ou da carga térmica).

Desta forma os 3 valores limites de danos desenvolvidos podem ser expressos por:

$$P_{L,ED1_IP1}; P_{L,ED2_IP2}; \text{ e } P_{L,ED2_IP3}.$$

A tabela 5.4.1 lista os três valores limites de danos propostos por *V. Cozzani e E. Salzano*¹⁰.

Por comparação entre a intensidade calculada da sobrepressão (SAFETI®) causada por uma explosão e o valor limite de danos pode-se identificar o estado de danos e a intensidade de perda (IP) no equipamento secundário e avaliar a probabilidade ou não de ocorrência de um efeito secundário (etapa 2.4 da figura 5.3.1). Se a probabilidade de ocorrência do evento acidental secundário for suficientemente alta então cenários acidentais apropriados serão desenvolvidos e suas conseqüências analisadas. As conseqüências desses eventos podem, do mesmo modo, gerar um ou mais eventos acidentais terciários em equipamentos alvos terciários dando continuidade à propagação de acidentes.

2) Valor Limite de Danos por radiação térmica

Apenas um número limitado de dados é encontrado na literatura sobre danos a vasos de processos originados por radiação térmica e/ou contato com o fogo. *V. Cozzani, G. Gubinelli, G. Antonioni, G. Spadoni, S. Zanelli e outros*¹⁰ apresentaram em seus estudos um método simplificado para estimar esse tipo de dano.

O tempo de falha t_{ff} de uma série de vasos de estocagem atmosféricos e pressurizados foi estimado para diferentes eventos acidentais do tipo incêndios e comparado ao tempo de duração do cenário. Propagações de acidentes causadas pelo aquecimento de paredes de vasos de processo por uma radiação térmica estacionária são possíveis, mesmo sem o contato ou envolvimento do casco pelas chamas. A propagação de acidentes é considerada possível se o tempo de falha t_{ff} do equipamento alvo for menor que a duração do evento acidental primário no equipamento agressor.

A tabela 5.4.4 apresenta as expressões *V. Cozzani e E. Salzano*¹⁰ para a obtenção dos valores limites de danos por radiação representados pelos tempos de falha t_{ff} para dois tipos de equipamentos: vaso atmosférico cilíndrico vertical e vaso pressurizado cilíndrico horizontal. Para outros tipos de equipamentos vale observar apenas as seguintes considerações dos autores:

- (1) para um conjunto de vasos atmosféricos representativos e desprotegidos, o valor t_{ff} correspondente é maior que 30 min para uma intensidade de radiação menor que 10 kW/m^2 .
- (2) para um conjunto de vasos pressurizados representativos e desprotegidos, o valor t_{ff} correspondente é maior que 30 min para uma intensidade de radiação menor que 40 kW/m^2 .

É importante notar que os dados acima são conservativos, pois não se considerou nenhum isolamento térmico nos equipamentos.

O valor limite de danos representado pelo tempo de falha t_{ff} do equipamento está associado à classe de estado de dano ED2 e a categoria de intensidade de perda IP3. Se a probabilidade de ocorrência do evento acidental secundário for suficientemente alta então estes eventos deverão ser analisados. A tabela 5.4.2 lista os cenários acidentais secundários esperados em função do estado de dano e intensidade de perda da contenção. O potencial de propagação desses cenários é mostrado qualitativamente na tabela 5.4.3.

TABELA 5.4.1 – Valores Limites de Danos por sobrepressão (kPa)⁹.

Valor Limite de Danos (VLD)	Equipamento			
	Atmosférico	Pessurizado	Alongado	Auxiliar
P_{L,ED1} IP1	7	30	14	12
P_{L,ED2} IP2	16	38	37	37
P_{L,ED2} IP3	20	61	45	59

TABELA 5.4.2 - Cenários secundários esperados⁹.

Estado de Dano	Intensidade de Perda de Contenção	Eventos secundários esperados			
		Equipamento			
		Atmosférico	Pessurizado	Alongado	Auxiliar
ED1	IP1, inflamável	Pequeno Incêndio de Poça	Pequeno Jato de fogo	Pequeno Incêndio de Poça	Pequeno Incêndio de Poça
				Pequeno Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”	Pequeno Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”
ED1	IP1, tóxico	Evaporação de poça pequena	Poça em ebulição	Pequena Poça em ebulição	Evaporação de poça pequena
			Dispersão de jato tóxico	Dispersão tóxica	
ED2	IP2, inflamável	Incêndio de poça	Jato de fogo	Incêndio de poça	Pequeno Incêndio de Poça
		Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”	Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”	Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”	Pequeno Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”
		Explosão de Nuvem de Vapor	Explosão de Nuvem de Vapor	Explosão de Nuvem de Vapor	
ED2	IP2, tóxico	Evaporação de poça	Poça em ebulição	Poça em ebulição	Evaporação de poça pequena
		Dispersão tóxica	Dispersão de jato tóxico	Dispersão tóxica	
ED2	IP3, inflamável	Incêndio de poça	BLEVE / Bola de fogo	Incêndio de poça	Pequeno Incêndio de Poça
		Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”	Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”	Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”	Pequeno Incêndio de Nuvem tipo “Flashfire”
		Explosão de Nuvem de Vapor	Explosão de Nuvem de Vapor	Explosão de Nuvem de Vapor	
ED2	IP3, tóxico	Evaporação de poça	Poça em ebulição	Poça em ebulição	Evaporação de poça
		Dispersão tóxica	Dispersão de jato tóxico	Dispersão tóxica	Dispersão de poça pequena

TABELA 5.4.3 – Potencial de propagação¹⁰.

<u>Dano estrutural</u>	Perda de contenção	Potencial de propagação			
		Equipamento			
		Atmosférico	<u>Pressurizado</u>	Alongado	Auxiliar
ED1	IP1, inflamável	Baixo	Alto	Baixo	Baixo
ED2	IP2, inflamável	Alto	Alto	Alto	Baixo
ED2	IP3, inflamável	Alto	Alto	Alto	Baixo

TABELA 5.4.4 – Tempos de falha t_{ff} de equipamentos¹⁰.

Vetor de propagação e cenário primário	Equipamento alvo	Tempo de falha t_{ff} (s) do casco do equipamento
Radiação térmica para todos os cenários tipo incêndio	Vaso atmosférico cilíndrico vertical	$\ln(t_{ff}) = -1,128 \cdot \ln(I) - 2,667 \cdot 10^{-5} \cdot V + 9,877$ V: volume do vaso (m ³) I: Radiação térmica incidente (kW/m ²)
	Vaso pressurizado cilíndrico horizontal	$\ln(t_{ff}) = -0,947 \cdot \ln(I) + 8,835 \cdot V^{0,032}$ V: volume do vaso (m ³) I: Radiação térmica incidente (kW/m ²)

3) Valor Limite de Danos por projeção de fragmentos

A maioria das instalações industriais possui tubulações e vasos contendo gás pressurizado ou líquido superaquecido. São sistemas fechados. Uma explosão em tais sistemas pode produzir fragmentação da contenção e gerar mísseis. Isso pode causar danos em equipamentos de processo e estruturas.

O evento acidental primário (explosão com projeção de fragmentos) só se propaga quando um ou mais fragmentos atingirem um ou mais equipamentos secundários provocando danos em suas estruturas com perda de contenção e geração de um ou mais eventos acidentais secundários. As causas da explosão podem ser devidas a sobrepressão, falha mecânica ou envolvimento do vaso por chamas de um incêndio.

A metodologia da TNO²⁸ apresentada em seguida permite calcular o alcance máximo dos fragmentos (VLD por projeção de fragmentos). São tratadas tanto as falhas dos vasos contendo gases pressurizados como líquidos pressurizados superaquecidos. Métodos diferentes são usados conforme a forma em que energia interna é liberada e transformada em energia mecânica (explosão física de vaso contendo gás ideal, explosão física de vaso contendo gás não-ideal ou vapor; BLEVEs, reações químicas exotérmicas, decomposição energética de materiais ou explosão interna).

O risco apresentado pela queda de fragmentos num dado local está relacionado ao número de fragmentos que podem atingir esse local e ao potencial de danos que possuem dependendo de suas massas e velocidades.

O método utilizado no presente trabalho, pode ser ilustrado conforme mostra a figura 5.4.1. Detalhes sobre a aplicação deste método encontram-se no Apêndice B – Fragmentos. O método consiste, basicamente, de quatro etapas principais:

Etapas 1: Determinação do número de fragmentos, n_f

Não há métodos para se prever o número de fragmentos. Uma estimativa do número de fragmentos só pode ser feita através de uma aproximação prática baseada em análise histórica de explosões acidentais (Apêndice B – Fragmentos, tabela B.1).

FIGURA 5.4.1 – Metodologia para determinação do alcance máximo de fragmentos

Etapla 2: Determinação da massa do fragmento, M_f

Como para o número de fragmentos não há métodos para se prever a massa do fragmento apenas uma aproximação prática é usada. Conhecido o número de fragmentos n_f e massa do vaso vazio M_v , a massa média dos fragmentos será dada por :

$$M_f = \frac{M_v}{n_f} \quad (5.1)$$

Esta aproximação é aceitável em caso de ruptura do vaso em muitos fragmentos ou em poucos fragmentos, porem iguais, isto é, para vasos esféricos. Entretanto vasos cilíndricos não rompem em partes iguais, eles geralmente se rompem nos tampos. O vaso cilíndrico muitas vezes projeta seu tampo ao longo do eixo do vaso e o casco distorcido ao longo do eixo perpendicular a este eixo. A tabela B.2 do Apêndice B - Fragmentos, apresenta algumas sugestões.

Etapla 3: Método para a avaliação da velocidade do fragmento, M_f

O calculo da velocidade do fragmento é feito conforme um dos métodos apresentado na tabela B.3 do Apêndice B - Fragmentos.

Etapla 3a: Método da Energia Cinética

Os passos a serem seguidos para os cálculos através deste método se encontram na tabela B.4 do Apêndice B - Fragmentos.

Etapla 3b: Métodos de Baker e/ou Gel'fand

Os passos a serem seguidos para os cálculos através deste método se encontram nas tabelas B.5 e B.6 do Apêndice B - Fragmentos

Etapla 3c: Método de Moore

Este método é utilizado para o cálculo da velocidade inicial do fragmento para valores de pressão escalar $\overline{P}_1$ altos ou para verificar os valores de v_i calculados anteriormente. Os passos a serem seguidos para os cálculos através deste método se encontram na tabela B.7 do Apêndice B - Fragmentos.

Etapla 4: Avaliação do alcance máximo $R_{f \max}$ dos fragmentos projetados

Após o fragmento ter sido acelerado até uma certa velocidade, as forças atuando nele são as da gravidade e da dinâmica do fluido (ascensão e araste). Estas forças determinam a distância que o fragmento pode alcançar. Os passos a serem seguidos para os cálculos através deste método se encontram nas tabelas B.8 e B.9 do Apêndice B - Fragmentos.

5.5 Cálculo das frequências dos eventos secundários

A frequência esperada f_D do evento acidental secundário devido ao efeito dominó pode ser calculada pela seguinte expressão (V. Cozzani e E. Salzano⁶):

$$f_D = f_I \cdot P_D \quad (5.2)$$

onde:

f_I = frequência do evento crítico primário;

P_D = probabilidade de ocorrência do efeito dominó.

A probabilidade P_D , por sua vez, pode ser expressa por:

$$P_D = P_S \cdot P_d \cdot P_e \quad (5.3)$$

onde:

P_S = probabilidade do cenário causador da propagação

P_d = probabilidade de dano do equipamento alvo

P_e = probabilidade do evento acidental secundário ocorrer no equipamento alvo.

Os valores de f_I , P_S e P_e podem ser encontrados na literatura^{8,29,30}.

Para os vetores de propagação de sobrepressão e radiação térmica, V. Cozzani e E. Salzano¹⁰ desenvolveram equações do tipo “Probit” para avaliar a probabilidade P_d (tabela.5.5.1). As equações do tipo “Probit” permitem relacionar a intensidade do efeito físico com o nível de dano esperado e se apresentam da seguinte forma:

$$Y = k_1 + k_2 \ln V \quad (5.4)$$

onde:

Y = a variável Probit relacionada com a probabilidade de dano causado pelo evento acidental considerado;

V = variável de dano (sobrepressão P_S , tempo de “falha” t_{ff});

k_1 , k_2 = parâmetros Probit específicos dependentes do tipo de vetor de propagação

TABELA 5.5.1 – Modelos “probit” para probabilidade de dano¹⁰.

Vetor de propagação e cenário primário	Equipamento alvo	Modelo “probit” para Probabilidade de dano P_d
Sobrepresão para todos os cenários do tipo explosão		P_s (Pa): sobrepresão incidente.
	Vaso atmosférico	$Y = - 18,96 + 2,44 \ln (P_s)$
	Vaso pressurizado	$Y = - 42,44 + 4,33 \ln (P_s)$
	Vaso alongado	$Y = - 28,07 + 3,16 \ln (P_s)$
	Equipamentos auxiliares	$Y = - 17,79 + 2,18 \ln (P_s)$
Radiação térmica para todos os cenários do tipo incêndio		tff (s): tempo de falha do casco do equipamento.
	Vaso atmosférico cilíndrico vertical	$Y = 12,54 - 1,847 \cdot \ln (tff)$
	Vaso pressurizado cilíndrico horizontal	$Y = 12,54 - 1,847 \cdot \ln (tff)$

Para o vetor de propagação impacto de fragmento, *G. Gubinelli, S. Zanelli, e V. Cozzani*¹¹ desenvolveram equações para avaliar a probabilidade $P_{d,F}$ de ocorrência do efeito dominó. Para um único fragmento $P_{d,F}$ pode ser expresso por:

$$P_{d,F} = P_{\text{gen},F} \times P_{\text{imp},F} \times P_{\text{dan},F} \quad (5.5)$$

onde:

$P_{\text{gen},F}$ é a probabilidade do fragmento F ser gerado no primeiro evento;

$P_{\text{imp},F}$ é a probabilidade do impacto ocorrer entre o fragmento e o alvo;

$P_{\text{dan},F}$ é a probabilidade de ocorrer dano no alvo dado o impacto do fragmento.

Se a probabilidade de impacto de dois ou mais fragmentos no mesmo alvo é suficientemente baixa, como costuma ser quando um número limitado de fragmentos for gerado no primeiro evento, a probabilidade esperada do efeito dominó causado por fragmentos atingindo um alvo secundário dado pode ser calculado por:

$$P_d = \sum_F P_{d,F} \quad (5.6)$$

A frequência f_d do efeito dominó causado por impacto de fragmentos gerados por um evento acidental primário, pode ser expresso por:

$$f_d = f_p \times P_d = f_p \times \sum_F P_{d,F} \quad (5.7)$$

onde f_p é a frequência esperada do evento primário.

Portanto a probabilidade do efeito dominó devido à geração de fragmento num evento acidental primário pode ser estimada quando se dispõe do número de fragmentos gerados e das probabilidades $P_{\text{gen},F}$, $P_{\text{imp},F}$ e $P_{\text{dan},F}$ para cada fragmento projetado. Uma hipótese conservativa normalmente usada neste tipo de avaliação é adotar $P_{\text{gen},F} = P_{\text{dan},F} = 1$.

A probabilidade $P_{\text{imp},F}$ pode ser calculada usando-se o modelo proposto por *G. Gubinelli, S. Zanelli, e V. Cozzani*¹¹ conforme expressões detalhadas no Apêndice B - Fragmentos.

5.6 Cálculo das consequências dos eventos acidentais secundários

Esta etapa da análise tem por objetivo verificar a possibilidade de ocorrência de eventos terciários pela avaliação dos danos consequentes dos eventos secundários. Os principais passos desta etapa estão representados na figura 5.6.1 com os mesmos procedimentos apresentados no item 5.3 quando necessário.

FIGURA 5.6.1 - Procedimento para a análise do efeito dominó

6. ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO E RESULTADOS

6.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é aplicar a metodologia para a análise do efeito dominó proposta no Capítulo 5, como parte de uma Análise Quantitativa de Riscos (AQR) de uma instalação industrial química do ciclo do Combustível Nuclear (CCN).

A figura 6.1.1 mostra o arranjo físico típico de instalações de um complexo industrial nuclear de produção de combustível nuclear que será objeto do presente estudo de caso. Esse complexo abriga usinas de conversão, enriquecimento, reconversão e montagem de elementos combustíveis. Na etapa de conversão o “yellow cake”, é convertido em hexafluoreto de urânio (UF_6), matéria prima do enriquecimento isotópico. Na etapa de enriquecimento o isótopo mais leve $^{235}\text{UF}_6$ é separado do isótopo mais pesado $^{238}\text{UF}_6$ numa centrífuga girando a alta velocidade. Arranjos em cascadas das centrífugas aumentam progressivamente o grau de enriquecimento até o valor desejado. Na reconversão, o UF_6 enriquecido é transformado em pastilhas de UO_2 sinterizadas. Na montagem, as pastilhas são colocadas em tubos de zircaloy formando varetas de combustível. Finalmente os elementos combustíveis são construídos agrupando-se varias varetas.

No presente trabalho analisou-se a área de estocagem da planta de reconversão, como possível iniciadora do efeito dominó (identificada por um círculo na figura 6.1.1). Essa área abriga um tanque de amônia, três tanques de propano, dois tanques de dióxido de carbono, dois tanques de metanol e um tanque de hidrogênio, sendo o conjunto disposto conforme indicado na figura 6.1.2. Detalhes sobre dimensões e coordenadas são apresentados no Apêndice C – Análise de conseqüências.

A metodologia descrita no capítulo 5 compreende sete etapas principais (item 5.2). Essas etapas são descritas a seguir.

6.2 Aplicação da Metodologia MIPAG

As Etapas 1 e 2 da metodologia MIPAG compreendem a identificação das substâncias perigosas e a seleção preliminar dos equipamentos perigosos. As substâncias e equipamentos presentes na área de estocagem são listados na tabela 6.2.1. Essa tabela também inclui a classificação de risco associada a cada equipamento (EQ4 = estocagem pressurizada, EQ6 = estocagem atmosférica).

FIGURA 6.1.1 – Complexo Industrial Nuclear para fabricação de Elementos Combustíveis.

FIGURA 6.1.1 - Complexo Industrial Nuclear para fabricação de Elementos Combustíveis (continuação).

FIGURA 6.1.2 - Arranjo físico da Área de Estocagem da Planta de Reconversão

Tabela 6.2.1 – Dados das substâncias e condições de armazenamento na área de estocagem da reconversão.

Substância								Equipamento	
Nome	Estado	Classificação de Perigo (*)	Classificação de Risco (*)	Massa (kg)	Pressão (bar abs)	Temperatura (°C)	Identificação	Nome	Tipo (**)
Amônia	líquido	F T C N	R10 R23 R34 R50	21.101,00	8,30	20,00	VP-001	Vaso de estocagem de Amônia	EQ4
Propano	líquido	F+	R12	1.329,00	8,40	20,00	VP-002	Vaso de estocagem de Propano 1	EQ4
							VP-003	Vaso de estocagem de Propano 2	EQ4
				2.658,00	8,40	20,00	VP-004	Vaso de estocagem de Propano 3	EQ4
Metanol	líquido	F T	R11 R23, R25	3.025,00	1,50	20,00	VA-001	Vaso de estocagem de Metanol 1	EQ6
							VA-002	Vaso de estocagem de Metanol 2	EQ6
Dióxido de carbono	líquido	■	■	12.500,00	25,00	20,00	VP-005 VP-006	Vaso de estocagem de Dióxido de carbono	EQ4
Hidrogênio	gás	F+	R12	500,00	200,00	20,00	VP-007	Vaso de estocagem de Hidrogênio	EQ4

(*) cf. Apêndice A – Classificação de Perigo e de Risco das substâncias

(**) cf. tabela 5.2.2 – Tipos de equipamento

A Etapa 3 corresponde à seleção dos equipamentos com base em critérios preestabelecidos. Neste caso os critérios adotados foram o de massa crítica M_b e critério de distância mínima (50m).

Dos nove tanques existentes na área de estocagem, sete foram selecionados. Pelo critério de massa crítica M_b foram selecionados o tanque de amônia (VP-001), o tanque de propano (VP-004), os tanques de dióxido de carbono (VP-005 e VP-006) e o tanque de hidrogênio (VP-007). Pelo critério de distância mínima foram selecionados os dois outros tanques de propano (VP-002 e VP-003). Os tanques de metanol não foram identificados como perigosos pelos dois critérios propostos, portanto não serão considerados nas etapas posteriores do método MIPAG. A tabela 6.2.2 resume os principais elementos utilizados na seleção dos equipamentos perigosos.

A Etapa 4 da metodologia MIPAG associa eventos críticos a cada equipamento selecionado na etapa 3. Essa associação é feita mediante a aplicação das matrizes EST-EQ, EQ-ECP e EST-ECP definidas no capítulo 5, item 5.2.

O objetivo da matriz EST-EQ é verificar a compatibilidade do estado da substância com o tipo de equipamento. Essa matriz (tabela 6.2.3) mostra que a área analisada abriga estocagem pressurizada e tubulações (classificadas como EQ4 e EQ10 respectivamente). As substâncias contidas nesses equipamentos estão no estado bifásico e/ou gás/vapor (estados EST3 e EST4). Na tabela 6.2.3 e nas subseqüentes destaca-se em vermelho as características do estudo de caso. A matriz EQ-ECP (tabela 6.2.4) relaciona os equipamentos selecionados (todos com classificação de perigo EQ4-estocagem pressurizada). Essa associação permite identificar cinco tipos de eventos críticos primários:

ECP6 - Furo no casco na fase vapor;

ECP7 - Furo no casco na fase líquida;

ECP8 – Vazamento líquido em tubulações;

ECP9 – Vazamento gasoso em tubulações; e

ECP10 – Ruptura catastrófica.

A matriz EST-ECP (tabela 6.2.5) cruza as informações obtidas com as duas matrizes anteriores, associando o estado da substância contida com o evento crítico primário. Finalizando a Etapa 4, constroi-se a matriz EQ-EST-ECP (tabela 6.2.6) que reúne informações das três matrizes anteriores para uso nas etapas seguintes do processo MIPAG.

Tabela 6.2.2 - Identificação de Equipamentos Perigosos Relevantes

Identificação do equipamento	Tipo de equipamento	Substância	Estado físico	Temperatura de ebulição (p atm) °C	Temperatura de serviço (°C)	Classificação de Perigo	Classificação de Risco	Inventário M (kg)	Massa de Referência Ma (kg)	Coefficiente S1	Coefficiente S2	Coefficiente S	Massa de Referência Mb (kg)	Seleção se M>=Mb	Distância D do equipamento selecionado mais próximo (m)	Coefficiente S3	Massa de Referência Mc (kg)	Seleção se D<=50 m e M>=Mc
VP- 001	EQ4	amônia	líquido	-33,4	20,0	F C N	R10 R34 R50	21.101	10.000	3,42	0,67	4,09	2.446,31	sim	■	■	■	■
VP- 002	EQ4	propano	líquido	-42,0	20,0	F	R12	1.329	10.000	4,17	0,84	5,01	1.996,53	não	24	0,11	220,80	sim
VP- 003	EQ4	propano	líquido	-42,0	20,0	F	R12	1.329	10.000	4,17	0,84	5,01	1.996,53	não	3	0,10	199,65	sim
VP- 004	EQ4	propano	líquido	-42,0	20,0	F	R12	2.658	10.000	4,17	0,84	5,01	1.996,53	sim	3	0,10	199,65	sim
VA- 001	EQ6	metanol	líquido	65,0	20,0	F T	R11 R23, R25	3.025	10.000	0,35	-1,30	0,10	100.000,00	não	20	0,10	10000,00	não
VA-002	EQ6	metanol	líquido	65,0	20,0	F T	R11 R23, R25	3.025	10.000	0,35	-1,30	0,10	100.000,00	não	23	0,10	10000,00	não
VP-005	EQ4	dióxido de carbono	líquido	-78,5	20,0	-	-	12.500	10.000	9,66	1,57	10,00	1.000,00	sim	■	■	■	■
VP-006	EQ4	dióxido de carbono	líquido	-78,5	20,0	-	-	12.500	10.000	9,66	1,57	10,00	1.000,00	sim	■	■	■	■
VP- 007	EQ4	hidrogênio	gás	-252,8	20,0	F	R12	500	1.000	■	■	1,00	1.000,00	não	20,00	0,10	100,00	sim

TABELA 6.2.3 – Matriz EST-EQ

			EQ1 Estocagem de massa sólida
			EQ2 Estocagem de sólidos em pequenos acondicionamentos
	X	X	EQ3 Estocagem de fluidos em pequenos acondicionamentos
	X	X	EQ4 Estocagem pressurizada
			EQ5 Estocagem acolchoada
	X		EQ6 Estocagem atmosférica
			EQ7 Estocagem criogênica
	X	X	EQ8 Equipamento de transporte pressurizado
			EQ9 Equipamento de transporte atmosférico
	X	X	EQ10 Tubulações
	X	X	EQ11 Equipamento de estocagem intermediário integrado ao processo
	X	X	EQ12 Equipamento envolvendo a separação física de substâncias
	X	X	EQ13 Equipamento envolvendo reações químicas
	X	X	EQ14 Equipamento projetado para a produção e suprimento de energia
	X	X	EQ15 Equipamento para acondicionamento ou empacotamento
	X	X	EQ16 Outros equipamentos
Bitúmico	EST3		
Gás/Vapor	EST4		

X : associações EST-EQ para o caso analisado

TABELA 6.2.4 – Matriz EQ-ECP

	ECP1 Decomposição	ECP2 Explosão	ECP3 Materiais escoando (arrastados pelo ar)	ECP4 Materiais escoando (arrastados por um líquido)	ECP5 Início de incêndio (PIF)	ECP6 Furo no casco na fase vapor	ECP7 Furo no casco na fase líquida	ECP8 Vazamento líquido em tubulações	ECP9 Vazamento gasoso em tubulações	ECP10 Ruptura catastrófica	ECP11 Colapso do vaso	ECP12 Colapso do teto
EQ1 Estocagem de massa sólida	X	X	X	X	X							
EQ2 Estocagem de sólidos em pequenos acondicionamentos					X					X		
EQ3 Estocagem de fluidos em pequenos acondicionamentos					X	X	X			X		
EQ4 Estocagem pressurizada					X	X	X	X	X	X		
EQ5 Estocagem acolchoada					X		X	X		X	X	
EQ6 Estocagem atmosférica					X		X	X		X	X	X
EQ7 Estocagem criogênica					X	X	X	X	X	X	X	
EQ8 Equipamento de transporte pressurizado					X	X	X	X	X	X		
EQ9 Equipamento de transporte atmosférico					X		X	X		X	X	
EQ10 Tubulações					X			X	X			
EQ11 Equipamento de estocagem intermediário integrado ao processo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EQ12 Equipamento envolvendo a separação física de substâncias					X	X	X	X	X	X		
EQ13 Equipamento envolvendo reações químicas					X	X	X	X	X	X		
EQ14 Equipamento projetado para a produção e suprimento de energia					X	X	X	X	X	X		
EQ15 Equipamento para acondicionamento ou empacotamento			X	X	X			X	X			
EQ16 Outros equipamentos					X	X	X	X	X	X		

X : associações EST-EQ para o caso analisado

TABELA 6.2.5 – Matriz EST-ECP

	Bitânico	EST3	EST4	
				ECP1 Decomposição
				ECP2 Explosão
				ECP3 Materiais escoando (arrastados pelo ar)
				ECP4 Materiais escoando (arrastados por um líquido)
X	X			ECP5 Início de incêndio (PIF)
X	X			ECP6 Furo no casco na fase vapor
	X			ECP7 Furo no casco na fase líquida
	X			ECP8 Vazamento líquido em tubulações
X	X			ECP9 Vazamento gasoso em tubulações
X	X			ECP10 Ruptura catastrófica
				ECP11 Colapso do vaso
				ECP12 Colapso do teto

X: associações EST-EC para o caso analisado

TABELA 6.2.6 – Matriz EQ_EST_ECP

EQ4 Estocagem pressurizada Bifásico EST3 Gás/Vapor EST4 Resultados		ECP1 Decomposição										
		ECP2 Explosão										
		ECP3 Materiais esoadando (arrastados pelo ar)										
		ECP4 Materiais escoando (arrastados por um líquido)										
		ECP5 Início de incêndio (PIF)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		ECP6 Furo no casco na fase vapor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		ECP7 Furo no casco na fase líquida	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		ECP8 Vazamento líquido em tubulações	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		ECP9 Vazamento gasoso em tubulações	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		ECP10 Ruptura catastrófica	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		ECP11 Colapso do vaso										
		ECP12 Colapso do teto										

X : associações EST-EQ; **X** : resultados finais.

A Etapa 5 do processo MIPAG compreende a elaboração de árvores de falhas para cada evento crítico primário identificado na etapa anterior. Para cobrir os cinco eventos, são necessárias treze árvores de falhas como mostra a tabela 6.2.7. Elas correspondem basicamente, a ocorrência de vazamentos de pequeno, médio e grande porte e de rupturas catastróficas. Essas árvores de falhas cobrem todas as situações possíveis de ocorrer na área de estocagem. A estrutura de cada uma dessas árvores é mostrada nas figuras 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4, 6.2.5, 6.2.6 e 6.2.7. As figuras 6.2.1 a 6.2.6 são idênticas para furos em cascos ou vazamentos em tubulações ocorridos tanto na fase vapor como na fase líquida.

A Etapa 6 identifica, inicialmente, a associação entre os eventos críticos primários e os eventos críticos secundários. Essa associação é expressa pela matriz ECP-EST-ECS (tabela 6.2.8). Foram identificados, nesta Etapa, cinco tipos possíveis de eventos críticos secundários:

ECS2 – Ruptura catastrófica;

ECS3 – Formação de poça;

ECS5 – Jato gasoso;

ECS6 – Nuvem gasosa; e

ECS7 – Jato bifásico.

O segundo passo da Etapa 6 associa os eventos críticos secundários com os possíveis eventos críticos terciários. Essa associação é mostrada na matriz ECS-ECT (tabela 6.2.9), onde foram identificados oito eventos críticos terciários:

ECT2 – Ruptura catastrófica;

ECT4 – Poça e ignição;

ECT5 – Dispersão gasosa;

ECT7 – Jato gasoso e ignição;

ECT8 – Nuvem gasosa e ignição;

ECT9 – Jato bifásico e ignição;

ECT10 – Nuvem tipo aerosol e ignição; e

ECT11 – Poça sem ignição / Dispersão gasosa.

O próximo passo associa os eventos críticos terciários aos fenômenos perigosos. Essa associação é mostrada na matriz ECT-FP (tabela 6.2.10) onde são identificados nove fenômenos perigosos:

FP1 – Incêndio de poça;

- FP3 – Jato de fogo;
- FP4 – Explosão de nuvem de vapor;
- FP5 – “Flashfire”
- FP6 – Nuvem tóxica;
- FP8 – Projeção de mísseis;
- FP9 – Sobrepressão;
- FP10 – Bola de fogo; e
- FP11 – Danos ambientais.

O último passo da Etapa 6 consiste na construção das árvores de eventos para cada fenômeno perigoso, usando as informações obtidas nos passos anteriores. Essas árvores são mostradas nas figuras 6.2.8 a 6.2.12. A quantificação desses fenômenos perigosos é feita na próxima seção item 6.3.

TABELA 6.2.7 - Lista de árvores genéricas propostas pelo MIPAG para os eventos críticos selecionados

Identificação do Evento Crítico Primário	Evento Crítico Primário	Arvore de Falhas genérico (AF)	Furo_Dimensões sugeridas
ECP6	Furo no casco do lado da fase vapor	AF Furo grande no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 100 mm
		AF Furo médio no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 35 – 50 mm
		AF Furo pequeno no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 10 mm
ECP7	Furo no casco do lado da fase líquida	AF Furo grande no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 100 mm
		AF Furo médio no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 35 – 50 mm
		AF Furo pequeno no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 10 mm
ECP8	Vazamento líquido na tubulação	AF Furo grande no casco ou vazamento pela tubulação	Ruptura total da tubulação
		AF Furo médio no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 22 – 44 % do diâmetro da tubulação
		AF Furo pequeno no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 10 % do diâmetro da tubulação
ECP9	Vazamento gasoso na tubulação	AF Furo grande no casco ou vazamento pela tubulação	Ruptura total da tubulação
		AF Furo médio no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 22 – 44 % do diâmetro da tubulação
		AF Furo pequeno no casco ou vazamento pela tubulação	Diâmetro de 10 % do diâmetro da tubulação
ECP10	Ruptura catastrófica	AF Ruptura catastrófica	-

FIGURA 6.2.1 – Árvore de falhas para “Furo grande no casco_Fase Líquida ou Fase Vapor”

FIGURA 6.2.2 – Árvore de falhas para “Furo médio no casco_Fase Líquida ou Fase Vapor”

FIGURA 6.2.3 – Árvore de falhas para “Furo pequeno no casco_Fase Líquida ou Fase Vapor”

FIGURA 6.2.4 – Árvore de falhas para “Vazamento grande na tubulação_Fase Líquida ou Fase Vapor”

FIGURA 6.2.5 – Árvore de falhas para “Vazamento médio na tubulação_Fase Líquida ou Fase Vapor”

FIGURA 6.2.6 – Árvore de falhas para “Vazamento pequeno na tubulação_Fase Líquida ou Fase Vapor”

FIGURA 6.2.7 – Árvore de falhas para – Árvore de falhas para “Ruptura catastrófica”

Tabela 6.2.8 - Matriz ECP-EST-ECS

Evento Crítico Primário		Compatibilidade EC-EST	Estado Físico		ECS1 Incêndio	ECS2 Ruptura catastrófica	ECS3 Formação de poça	ECS4 Poça dentro do tanque	ECS5 Jato gasoso	ECS6 Nuvem gasosa (Puff)	ECS7 Jato bifásico	ECS8 Nuvem tipo aerosol	ECS9 Explosão	ECS10 Materiais arrastados pelo ar	ECS11 Materiais arrastados por um líquido	ECS12 Decomposição
Furo no casco do lado vapor	ECP6	X	EST1	Sólido										X		
			EST2	Líquido												
		X	EST3	Bifásico					X							
		X	EST4	Gás / Vapor					X							
Furo no casco do lado líquido	ECP7		EST1	Sólido												
		X	EST2	Líquido			X									
		X	EST3	Bifásico			X				X					
			EST4	Gás / Vapor												
Vazamento líquido numa tubulação	ECP8		EST1	Sólido												
		X	EST2	Líquido			X									
		X	EST3	Bifásico			X				X					
			EST4	Gás / Vapor												
Vazamento gasoso numa tubulação	ECP9		EST1	Sólido												
			EST2	Líquido												
		X	EST3	Bifásico					X							
		X	EST4	Gás / Vapor					X							
Ruptura catastrófica	ECP10		EST1	Sólido												
		X	EST2	Líquido		X	X									
		X	EST3	Bifásico		X	X					X				
		X	EST2	Gás / Vapor		X	X			X						

TABELA 6.2.9 – Matriz ECS-ECT

[illegible]

TABELA 6.2.10 – Matriz ECT-FP

Evento Crítico Terciário														
		FP1 Incêndio de poça	FP2 Incêndio de tanque	FP3 Jato de fogo	FP4 Explosão de nuvem de vapor	FP5 Flashfire	FP6 Nuvem tóxica	FP7 Incêndio	FP8 Projeção de mísseis	FP9 Sobrepressão	FP10 Bola de fogo	FP11 Danos ambientais	FP12 Explosão de pó	FP13 Boilover e subsequente incêndio de poça
Incêndio	ECT1							X						
Ruptura catastrófica	ECT2								X	X				
Poça e ignição dentro do tanque	ECT3		X				X					X		X
Poça e ignição	ECT4	X					X					X		
Dispersão gasosa	ECT5				X	X	X					X		
Produtos secundários tóxicos	ECT6						X					X		
Jato gasoso e ignição	ECT7			X			X					X		
Nuvem gasosa e ignição	ECT8						X			X	X			
Jato bifásico e ignição	ECT9			X			X				X			
Nuvem tipo aerosol e ignição	ECT10						X			X	X			
Poça sem ignição / Dispersão da poça	ECT11										X			
Explosão Nuvem de pó e ignição	ECT12							X	X			X		
Dispersão de pó	ECT13						X					X

FIGURA 6.2.8 – Árvore de Eventos para “Furo no casco_Lado líquido”

FIGURA 6.2.9 – Árvore de Eventos para “Furo no casco_Lado vapor”

FIGURA 6.2.10 – Árvore de Eventos para “Vazamento líquido numa tubulação”

FIGURA 6.2.11 – Árvore de Eventos para “Vazamento gasoso numa tubulação”

FIGURA 6.2.12 – Árvore de Eventos para “Ruptura catastrófica”

6.3 Análise de conseqüências

A análise efetuada no item anterior resultou na seleção de 24 fenômenos perigosos associados às tancagens de amônia, propano, dióxido de carbono e hidrogênio. A relação desses fenômenos, os equipamentos e eventos críticos associados é mostrada na tabela 6.3.1. A análise de efeito dominó feita no presente item considera esses fenômenos perigosos como eventos acidentais primários (ou eventos acidentais iniciadores) de possíveis propagações de acidentes (“efeito dominó”).

A análise de conseqüências apresentada nesta seção é feita considerando-se cada vaso como uma fonte agressora e os demais alvos dessa fonte. Cada vaso agressor é uma fonte potencial de eventos acidentais primários que representam uma ameaça aos outros vasos. A interação entre um vaso agressor e o seu alvo se dá através dos vetores de propagação.

A quantificação dos eventos acidentais primários foi feita utilizando-se os modelos de conseqüências disponíveis no código SAFETI® (Apêndice D – Modelos de conseqüências SAFETI®). Os principais dados necessários à quantificação dos eventos acidentais primários incluem:

- Arranjo físico da área de tancagem (distâncias relativas e dimensões dos vasos);
- Dados sobre os tanques (substâncias armazenadas, condições de armazenamento; quantidades, etc.);
- Condições de dispersão atmosféricas (classe de estabilidade, direção e velocidade do vento, etc.).

O processo de quantificação do efeito dominó foi desenvolvido em algumas etapas principais. Numa primeira etapa, determinou-se o estado de danos e intensidade de perdas sofridas pelos tanques alvos em decorrência da ação dos vetores dos eventos acidentais primários. Os critérios adotados na avaliação desses dois parâmetros são aqueles descritos no capítulo 5 item 5.4.

Os resultados dessa análise de vulnerabilidade estão resumidos nas tabelas 6.3.2 a 6.3.8, onde também estão listados os tipos de eventos acidentais secundários associados a cada vaso alvo. Os resultados detalhados dessa avaliação para os vasos VP-001_Estocagem de amônia e VP-003_Estocagem de propano, considerados os vasos mais agressivos na propagação de acidentes, encontram-se no Apêndice C – Análise de conseqüências. Os demais resultados para os outros vasos seriam obtidos e listados de maneira semelhante.

TABELA 6.3.1 – Fenômenos Perigosos selecionados

Identificação	Tipo de equipamento	Substância contida	ECP	ECS	ECT	FP
VP-001	EQ4	Amônia	Furo médio no casco do lado líquido	Formação de poça	Poça e ignição	Incêndio de poça
VP-001	EQ4	Amônia	Furo médio no casco do lado líquido	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de nuvem de vapor
VP-001	EQ4	Amônia	Vazamento líquido numa tubulação (ruptura total)	Jato bifásico	Dispersão gasosa e ignição	Jato de fogo
VP-002	EQ4	Propano	Furo médio no casco do lado líquido	Formação de poça	Poça e ignição	Incêndio de poça
VP-002	EQ4	Propano	Furo médio no casco do lado líquido	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de nuvem de vapor
VP-002	EQ4	Propano	Vazamento líquido numa tubulação (ruptura total)	Jato bifásico	Dispersão gasosa e ignição	Jato de fogo
VP-002	EQ4	Propano	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Projeção de mísseis
VP-002	EQ4	Propano	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Sobrepresão
VP-003	EQ4	Propano	Furo médio no casco do lado líquido	Formação de poça	Poça e ignição	Incêndio de poça
VP-003	EQ4	Propano	Furo médio no casco do lado líquido	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de nuvem de vapor
VP-003	EQ4	Propano	Vazamento líquido numa tubulação (ruptura total)	Jato bifásico	Dispersão gasosa e ignição	Jato de fogo
VP-003	EQ4	Propano	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Projeção de mísseis
VP-003	EQ4	Propano	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Sobrepresão

TABELA 6.3.1 – Fenômenos Perigosos selecionados (continuação)

Identificação	Tipo de equipamento	Substância contida	ECP	ECS	ECT	FP
VP-004	EQ4	Propano	Furo médio no casco do lado líquido	Formação de poça	Poça e ignição	Incêndio de poça
VP-004	EQ4	Propano	Furo médio no casco do lado líquido	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de nuvem de vapor
VP-004	EQ4	Propano	Vazamento líquido numa tubulação (ruptura total)	Jato bifásico	Dispersão gasosa e ignição	Jato de fogo
VP-004	EQ4	Propano	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Projeção de mísseis
VP-004	EQ4	Propano	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Sobrepresão
VP-005	EQ4	Dióxido de Carbono	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Projeção de mísseis
VP-005	EQ4	Dióxido de Carbono	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Sobrepresão
VP-006	EQ4	Dióxido de Carbono	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Projeção de mísseis
VP-006	EQ4	Dióxido de Carbono	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Sobrepresão
VP-007	EQ4	Hidrogênio	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Projeção de mísseis
VP-007	EQ4	Hidrogênio	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Ruptura catastrófica	Sobrepresão

EF: Explosão Física
ENV: Explosão de Nuvem (VCE)
INV: Incêndio de Nuvem (“Flashfire”)
IPo: Incêndio de Poça

JF: Jato de Fogo
JG: Jato Gasoso
BLEVE: Explosão de expansão fervendo do vapor do líquido

Tabela 6.3.2 – Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-001

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso (s) Alvo (s)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Evento Secundário		
									(1)	(2)	(3)
VP-001	Furo no casco de 50 mm (Lado líquido)	IPo	Radiação	E 3,5m/s	0°	VP-002, VP-003, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-005, VP-006	ED2	IP3	BLEVE	-	-
						VP-007	ED2	IP3	EF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
				D 5,0m/s	30°, 90°	VP-002, VP-003, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-005, VP-006	ED2	IP3	BLEVE	-	-
						VP-007	ED2	IP3	EF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
	Vazamento líquido numa tubulação rompida	JF	Radiação	D 5,0m/s	90°	VP-002	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
	Furo no casco de 50 mm (Lado líquido)	ENV	Sobrepresão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-002, VP-003, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-005, VP-006	ED2	IP3	BLEVE	-	-
						VP-007	ED2	IP3	EF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
	Ruptura Catastrófica	BLEVE	Sobrepresão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-002, VP-003	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-004	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-005	ED2	IP2	JG	-	-
						VP-006	ED1	IP1	JG	-	-
						VP-007	ED2	IP3	EF	ENV	-
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-

Tabela 6.3.3 – Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-002

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso (s) Alvo (s)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Evento Secundário		
									(1)	(2)	(3)
VP-002	Vazamento líquido	JF	Radiação	E 3,5m/s	0°	VP-003	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
				D 5,0m/s	30°, 90°	VP-003, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
	Furo no casco de 50 mm	ENV	Sobrepressão	E 3,5m/s	0°	VP-001	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-003, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
				D 5,0m/s	30°	VP-003, VP-004	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VA-001	ED2	IP3	IPo	ENV	INV
						VA-002	ED2	IP2	IPo	-	-
				D 5,0m/s	90°	VP-003, VP-004	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-005	ED2	IP2	JG	-	-
						VP-006	ED1	IP1	JG	-	-
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
	Ruptura Catastrófica	BLEVE	Sobrepressão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-003, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VA-001	ED2	IP2	IPo	ENV	INV
						VA-002	ED1	IP1	IPo	-	-
			Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-

Tabela 6.3.4 – Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-003

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso (s) Alvo (s)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Tipo de Evento Secundário		
									(1)	(2)	(3)
VP-003	Vazamento líquido numa tubulação	JF	Radiação	D 5,0m/s	30°, 90°	VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
	Furo no casco de 50 mm (Lado líquido)	ENV	Sobrepresão	E 3,5m/s	0°	VP-001	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-002, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
				D 5,0m/s	30°	VP-002	ED1	IP1	JF	-	-
						VP-004	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VA-001	ED2	IP3	IPo	-	-
						VA-002	ED2	IP2	IPo	-	-
				D 5,0m/s	90°	VP-002	ED1	IP1	JF	-	-
						VP-004	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-005, VP-006	ED1	IP1	JG	-	-
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
	Furo no casco de 50 mm (Lado líquido)	BLEVE	Sobrepresão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-002, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VA-001	ED2	IP2	IPo	-	-
						VA-002	ED1	IP1	IPo	-	-
			Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	-	-	-	-	-	-

Tabela 6.3.5 – Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-004

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso (s) Alvo (s)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Evento Secundário		
									(1)	(2)	(3)
VP-004	Furo no casco de 50 mm (Lado líquido)	ENV	Sobrepessão	E 3,5m/s	0°	VP-001	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-002, VP-003	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-005	ED2	IP2	JG	-	-
						VP-006	ED1	IP1	JG	-	-
						VP-007	ED1	IP1	JF	-	-
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
				D 5,0m/s	30°	VP-002, VP-003	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
				D 5,0m/s	90°	VP-002, VP-003	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-005, VP-006	ED2	IP2	JG	-	-
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
	Furo no casco de 50 mm (Lado líquido)	BLEVE	Sobrepessão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	-	VP-002, VP-003	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VA-001	ED2	IP3	IPo	-	-
						VA-002	ED2	IP2	IPo	-	-
			Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	-	VP-005, VP-006	ED2	IP3	BLEVE	-	-

Tabela 6.3.6 – Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-005

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso (s) Alvo (s)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Tipo de Evento Secundário		
									(1)	(2)	(3)
VP-005	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	Sobrepessão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-001	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-002, VP-003, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-006	ED2	IP3	EF	-	-
						VP-007	ED2	IP3	EF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
		BLEVE/FG	Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	-	VP-004	ED2	IP3	BLEVE	ENV	INV
						VP-006	ED2	IP3	EF	-	-

Tabela 6.3.7 – Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-006

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso (s) Alvo (s)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Tipo de Evento Secundário		
									(1)	(2)	(3)
VP-006	Ruptura Catastrófica	EF	Sobrepresão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-001	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-002, VP-003, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-005	ED2	IP3	EF	-	-
						VP-007	ED2	IP3	EF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
	Ruptura Catastrófica	BLEVE	Sobrepresão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-001	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-002, VP-003, VP-004	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-005	ED2	IP3	EF	-	-
						VP-007	ED2	IP3	EF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
			Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	-	VP-004	ED2	IP3	BLEVE	ENV	INV
						VP-005	ED2	IP3	EF	-	-

Tabela 6.3.8 – Análise de vulnerabilidade / Vaso agressor VP-007

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso (s) Alvo (s)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Tipo de Evento Secundário		
									(1)	(2)	(3)
VP-007	Vazamento líquido numa tubulação rompida	JF	Radiação	E 3,5m/s	0°	VP-001	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
				D 5,0m/s	90°	VA-001	ED2	IP3	IPo	-	-
	Furo no casco de 50 mm (Lado líquido)	ENV	Sobrepresão	E 3,5m/s	0°	VP-001	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
				D 5,0m/s	30°	VP-001	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-002	ED1	IP1	JF	-	-
				D 5,0m/s	90°	VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	ENV	INV
						VP-005, VP-006	ED2	IP2	JG	-	-
	Ruptura Catastrófica	EF	Sobrepresão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	-	VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
						VP-001	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
						VP-002, VP-003, VP-004	ED2	IP2	JF	ENV	INV
						VP-005, VP-006	ED2	IP3	EF	-	-
						VA-001, VA-002	ED2	IP3	IPo	-	-
			Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	-	VP-001	ED2	IP3	BLEVE	ENV	INV

Numa segunda etapa foram estimadas as frequências e probabilidades associadas aos eventos que caracterizam a ocorrência do efeito dominó.

A frequência f_D de um evento acidental secundário foi calculada pela expressão fornecida por V. Cozzani e E. Salzano⁸ (vide capítulo 5 item 5.5).

$$f_D = f_I \cdot P_D \quad (6.1)$$

onde:

f_I = frequência do evento crítico primário;

P_D = probabilidade de ocorrência do efeito dominó.

As frequências f_I dos eventos críticos primários foram extraídas da literatura especializada (referências 8, 29 e 30).

A probabilidade de ocorrência do efeito dominó P_D é dada por:

$$P_D = P_S \cdot P_d \cdot P_e \quad (6.2)$$

onde:

P_S = probabilidade do cenário causador da propagação (fenômeno perigoso)

P_d = probabilidade de dano do equipamento alvo

P_e = probabilidade do evento acidental secundário ocorrer no equipamento alvo.

As probabilidades P_d foram estimadas usando-se as expressões de probit desenvolvidas por V. Cozzani e E. Salzano¹⁰ (vide capítulo 5, item 5.5, tabela 5.5.1). Os resultados estão listados nas tabelas 6.3.9 a 6.3.15.

As probabilidades de ocorrência dos eventos acidentais primários e secundários foram extraídas da literatura (referências 8, 29 e 30) e estão listados nas tabelas 6.3.16, 6.3.17 e 6.3.18.

Para concluir a análise das frequências dos possíveis eventos acidentais secundários e identificar os efeitos dominó, foram calculados os valores das frequências esperadas f_D para os casos listados nas tabelas 6.3.2 a 6.3.8. Os valores obtidos são comparados com o critério usualmente utilizado na área nuclear adotado como **10^{-7} eventos/ano**. A relação de eventos do tipo efeito dominó enquadrados neste critério encontram-se listadas na tabela 6.3.19.

Um evento acidental primário pode gerar vários eventos acidentais secundários. Mas neste estudo, o evento tipo efeito dominó assim gerado apresentaria uma frequência muito inferior ao critério de 10^{-7} eventos/ano adotado para plantas nucleares e conseqüentemente não seria considerado.

Resultados obtidos

A tabela 6.3.19 apresenta os eventos do tipo efeito dominó identificados conforme a metodologia e com o critério de 10^{-7} eventos/ano propostos. Os fenômenos de propagação de acidentes identificados revelam que os eventos acidentais primários ocorreram nos vasos de estocagem pressurizados de amônia, propano e dióxido de carbono tendo como tipos de eventos acidentais iniciadores os eventos BLEVE e explosão de nuvem de vapor. Estes eventos acidentais primários geraram eventos acidentais secundários caracterizados por BLEVEs nos vasos pressurizados contendo propano e dióxido de carbono e um incêndio de poça num dos vasos atmosféricos de metanol. O vetor de propagação responsável pelo encadeamento de acidentes foi a sobrepressão causada pelo fenômenos BLEVE e explosão de nuvem de vapor. A geração de mísseis que acompanha a ruptura catastrófica dos vasos estudados seria responsável pela propagação de acidentes com frequências da ordem de 10^{-10} a 10^{-16} , abaixo do valor de tolerância de 10^{-7} adotado e por isso não foram considerados pela análise.

Tabela 6.3.9 - Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-001)

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso Alvo	Probit (Y) (*)	P_d
VP-001	Furo no casco de 50 mm (Lado líquido)	IPo	E 3,5m/s	0°	VP-002	4,49	3,05E-01
					VP-003	4,49	3,05E-01
					VP-004	3,83	1,21E-01
					VP-005	1,73	5,38E-04
					VP-006	1,44	1,85E-04
					VP-007	4,05	1,71E-01
					VA-001	2,93	1,92E-02
					VA-002	2,53	6,76E-03
			D 5,0m/s	30°	VP-002	4,49	3,05E-01
					VP-003	4,49	3,05E-01
					VP-004	4,05	1,71E-01
					VP-005	2,27	3,17E-03
					VP-006	1,87	8,74E-04
					VP-007	4,05	1,71E-01
					VA-001	3,47	6,30E-02
					VA-002	2,96	2,07E-02
			D 5,0m/s	90°	VP-002	4,49	3,05E-01
					VP-003	4,49	3,05E-01
					VP-004	3,79	1,13E-01
					VP-005	3,13	3,07E-02
					VP-006	2,94	1,97E-02
					VP-007	4,05	1,71E-01
					VA-001	4,45	2,91E-01
					VA-002	4,17	2,03E-01
	Vazamento líquido numa tubulação	JF	D 5,0m/s	90°	VP-002	1,88	9,04E-04

Tabela 6.3.10 - Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-002)

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso Alvo	Probit (Y) (*)	P_d
VP-002	Vazamento líquido	JF	E 3,5m/s	0°	VP-003	0,08	4,33E-07
			D 5,0m/s	30°	VP-003	1,22	7,84E-05
					VP-004	0,12	5,31E-07
			D 5,0m/s	90°	VP-003	3,26	4,09E-02
					VP-004	3,88	1,31E-01
	Furo no casco de 50 mm	ENV	E 3,5m/s	0°	VP-001	4,58	3,37E-01
					VP-003	5,87	8,08E-01
					VP-004	5,74	7,70E-01
					VA-001	6,19	8,83E-01
					VA-002	5,94	8,26E-01
			D 5,0m/s	30°	VP-003	3,44	5,94E-02
					VP-004	3,65	8,85E-02
					VA-001	5,32	6,26E-01
					VA-002	5,20	5,79E-01
			D 5,0m/s	90°	VP-003	3,65	8,85E-02
					VP-004	4,23	2,21E-01
					VP-005	3,33	4,75E-02
					VP-006	3,11	2,94E-02
					VA-001	6,35	9,11E-01
					VA-002	6,27	8,98E-01
	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-003	14,98	1,00E+00
					VP-004	8,96	1,00E+00
					VA-001	4,81	4,25E-01
					VA-002	4,33	2,51E-01
		BLEVE/FG	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VA-001	-	7,56E-03
					VA-002	-	7,54E-03

Tabela 6.3.11 - Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-003)

Vaso Agressor	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso Alvo	Probit (Y) (*)	P_d
VP-003	JF	Radiação	D 5,0m/s	30°	VP-004	0,86	1,74E-05
				90°	VP-004	3,00	2,28E-02
	ENV	Sobrepressão	E 3,5m/s	0°	VP-001	4,23	2,21E-01
					VP-002	5,87	8,08E-01
					VP-004	5,87	8,08E-01
					VA-001	5,94	8,26E+01
					VA-002	6,19	8,83E-01
					VA-002	6,19	8,83E-01
			D 5,0m/s	30°	VP-002	2,87	1,66E-02
					VP-004	3,44	5,94E-02
					VA-001	5,32	6,26E-01
					VA-002	5,08	5,32E-01
				90°	VP-002	2,61	8,42E-03
					VP-004	3,65	8,85E-02
					VA-001	6,11	8,67E-01
					VA-002	6,03	8,48E-01
	BLEVE	Sobrepressão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-002	14,98	1,00E+00
					VP-004	14,97	1,00E+00
					VA-001	4,81	4,25E-01
					VA-002	4,15	1,98E-01
		Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	-	-	-

Tabela 6.3.12 - Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-004)

Vaso Agressor	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso Alvo	Probit (Y) (*)	P_d
VP-004	ENV	Sobrepressão	E 3,5m/s	0°	VP-001	5,27	6,06E-01
					VP-002	7,10	9,82E-01
					VP-003	7,19	9,86E-01
					VP-005	3,55	7,35E-02
					VP-006	3,11	2,94E-02
					VP-007	2,74	1,19E-02
					VA-001	6,90	9,71E-01
					VA-002	6,71	9,56E-01
			D 5,0m/s	30°	VP-002	3,86	1,27E-01
					VP-003	4,05	1,71E-01
					VA-001	5,94	8,26E-01
					VA-002	5,75	7,73E-01
				90°	VP-002	3,44	5,94E-02
					VP-003	3,86	1,27E-01
					VP-005	3,65	8,85E-02
					VP-006	3,55	7,35E-02
					VA-001	6,64	9,49E-01
					VA-002	6,50	9,33E-01
	BLEVE/SP	Sobrepressão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	-	VP-002	10,92	1,00E+00
					VP-003	16,05	1,00E+00
					VA-001	5,55	7,09E-01
					VA-002	5,08	5,32E-01
	BLEVE/FG	Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	-	VP-005	-	6,90E-03
					VP-006	-	5,97E-03

Tabela 6.3.13 - Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-005)

Vaso Agressor	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso Alvo	Probit (Y) (*)	P_d
VP-005	BLEVE/SP	Sobrepressão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-001	4,41	2,78E-01
					VP-002	8,02	9,99E-01
					VP-003	8,27	9,99E-01
					VP-004	8,38	1,00E+00
					VP-006	21,35	1,00E+00
					VP-007	6,22	8,89E-01
					VA-001	16,99	1,00E+00
					VA-002	14,87	1,00E+00
	BLEVE/FG	Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-004	-	2,46E-03
					VP-006	-	1,70E-02

Tabela 6.3.14 - Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-006)

Vaso Agressor	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso Alvo	Probit (Y) (*)	P_d
VP-006	BLEVE/SP	Sobrepressão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-001	3,95	1,47E-01
					VP-002	6,95	9,74E-01
					VP-003	7,14	9,84E-01
					VP-004	7,23	9,87E-01
					VP-005	21,35	1,00E+00
					VP-007	6,17	8,79E-01
					VA-001	14,87	1,00E+00
					VA-002	16,99	1,00E+00
	BLEVE/FG	Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-004	-	2,12E-03
					VP-005	-	1,70E-02

Tabela 6.3.15 - Probabilidade de dano do equipamento alvo (vaso agressor VP-007)

Vaso Agressor	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de Propagação	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso Alvo	Probit (Y) (*)	P_d
VP-007	JF	Radiação	E 3,5m/s	0°	VP-001	2,40	4,66E-03
			D 5,0m/s	90°	VA-001	2,34	3,91E-03
	ENV	Sobrepressão	E 3,5m/s	0°	VP-001	5,27	6,06E-01
					VA-001	5,84	8,00E-01
					VA-002	5,65	7,42E-01
			D 5,0m/s	30°	VP-001	5,41	6,59E-01
					VP-002	2,61	8,42E-03
					VA-001	6,77	9,62E-01
					VA-002	6,43	9,24E-01
			D 5,0m/s	90°	VP-005	3,95	1,47E-01
					VP-006	3,76	1,07E-01
					VA-001	8,73	1,00E+00
					VA-002	8,59	1,00E+00
	EF	Sobrepressão	E 3,5m/s; D 5,0m/s	-	VP-001	8,09	9,99E-01
					VP-002	5,27	6,06E-01
					VP-003	4,66	3,67E-01
					VP-004	4,14	1,95E-01
					VP-005	5,93	8,24E-01
					VP-006	5,87	8,08E-01
					VA-001	9,51	1,00E+00
					VA-002	9,45	1,00E+00
	EF/FG	Fragmentos	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-001	-	8,46E-03

Tabela 6.3.16 - Frequência do evento crítico primário

Vaso pressurizado		
Tipo de ECP : ECP6 e ECP7		
Tipo de furo	Tamanho do furo	f_I
Médio	Diâmetro de 35 – 50 mm	5,00E-07
Tipo de ECP : ECP10		
Ruptura catastrófica		5,00E-07
Vaso atmosférico		
Tipo de ECP : ECP6 e ECP7		
Tipo de furo	Tamanho do furo	f_I
Médio	Diâmetro de 35 – 50 mm	5,00E-06
Tipo de ECP : ECP10		
Ruptura catastrófica		5,00E-06
Tubulações		
Tipo de ECP : ECP8 e ECP9		
Ruptura total da tubulação		9,90E-07

Tabela 6.3.17 - Frequência do evento acidental primário

Vaso pressurizado		
Evento acidental primário	ECP	P_s
Incêndio de poça	Furo no casco	1,00E-01
	Ruptura catastrófica	1,00E-01
Jato de fogo	Furo no casco	2,00E-01
	Tubulação rompida	2,00E-01
Explosão de nuvem de vapor	Furo no casco	8,00E-02
	Ruptura catastrófica	8,00E-02
Incêndio de nuvem de vapor	Furo no casco	5,00E-01
	Ruptura catastrófica	1,20E-01
BLEVE/BF	Ruptura catastrófica	7,00E-01
EF	Explosão Física	5,00E-07
JG	Jato gasoso	1,00E+00
Vaso atmosférica		
Evento acidental primário	ECP	P_s
Incêndio de poça	Furo no casco	1,00E-01
	Ruptura catastrófica	1,00E-01
Explosão de nuvem de vapor	Furo no casco	2,00E-01
	Ruptura catastrófica	2,00E-01
Incêndio de nuvem de vapor	Furo no casco	3,00E-01
	Ruptura catastrófica	3,00E-01

Tabela 6.3.18 - Frequência do evento acidental secundário

Vaso pressurizado		
Evento acidental secundário	Tipo de dano	Pe
Incêndio de poça	Furo no casco	1,00E-01
	Ruptura catastrófica	1,00E-01
Jato de fogo	Furo no casco	2,00E-01
	Tubulação rompida	2,00E-01
Explosão de nuvem de vapor	Furo no casco	8,00E-02
	Ruptura catastrófica	8,00E-02
Incêndio de nuvem de vapor	Furo no casco	5,00E-01
	Ruptura catastrófica	1,20E-01
BLEVE/BF	Ruptura catastrófica	7,00E-01
EF	Explosão Física	5,00E-07
JG	Jato gasoso	1,00E+00
Vaso atmosférica		
Evento acidental secundário	Tipo de dano	Pe
Incêndio de poça	Furo no casco	1,00E-01
	Ruptura catastrófica	1,00E-01
Explosão de nuvem de vapor	Furo no casco	2,00E-01
	Ruptura catastrófica	2,00E-01
Incêndio de nuvem de vapor	Furo no casco	3,00E-01
	Ruptura catastrófica	3,00E-01

Tabela 6.3.19 – Eventos do tipo efeito dominó identificados

Vaso Agressor	Evento Crítico Primário (ECP)	Fenômeno Perigoso (FP)	Condições climáticas	Ângulo do vento	Vaso Alvo	Evento Acidental Secundário	Frequência f_D (eventos/ano)
VP-001	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-002	BLEVE/BF	2,43E-07
					VP-003	BLEVE/BF	2,21E-07
VP-002	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-003	BLEVE/BF	2,45E-07
					VP-004	BLEVE/BF	2,45E-07
VP-003	Furo no casco de 50 mm (Lado líquido)	ENV	E 3,5m/s	0°	VA-001	IPo	3,30E-07
	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-002	BLEVE/BF	2,45E-07
VP-004	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-004	BLEVE/BF	2,45E-07
					VP-003	BLEVE/BF	2,45E-07
VP-005	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-002	BLEVE/BF	2,45E-07
					VP-003	BLEVE/BF	2,45E-07
VP-006	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-004	BLEVE/BF	2,45E-07
					VP-006	BLEVE/BF	2,45E-07
VP-006	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	E 3,5m/s; D 5,0m/s	0°, 30°, 90°	VP-002	BLEVE/BF	2,39E-07
					VP-003	BLEVE/BF	2,41E-07
					VP-004	BLEVE/BF	2,42E-07
					VP-005	BLEVE/BF	2,45E-07

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O procedimento utilizado neste trabalho para avaliar a possibilidade de ocorrência do efeito dominó na área de tancagem de uma planta de reconversão se mostrou bastante eficaz. Foi possível identificar e analisar os principais acidentes, seus vetores de propagação, suas conseqüências, e suas freqüências de ocorrência. Foram selecionados 24 fenômenos perigosos associados às tancagens de amônia, propano, dióxido de carbono e hidrogênio. Identificou-se seis eventos acidentais secundários com freqüências de ocorrência superior a 10^{-7} eventos/ano e portanto considerados críveis. O vetor de propagação gerador desses acidentes foi a sobrepressão causada por BLEVE e pela explosão de nuvem de vapor. Mostrou-se que, para o presente estudo de caso, a contribuição dos mísseis como vetores de propagação de efeito dominó, é desprezível, pois suas freqüências de ocorrência são da ordem de 10^{-10} a 10^{-16} eventos/ano e assim considerados não críveis.

O procedimento de análise desenvolvido neste trabalho é geral, de modo que sua aplicação pode ser estendida a outras áreas de uma planta nuclear sem perda de eficiência do método. Uma interessante aplicação deste método seria analisar uma planta de conversão, que reúne várias substâncias químicas e radioativas e processos químicos relativamente complexos para a produção de hexafluoreto de urânio.

Do ponto de vista da metodologia, a análise do efeito dominó ainda necessita de vários desenvolvimentos. O procedimento apresentado neste trabalho, por exemplo, poderia ser expandido, automatizado para facilitar a análise dos inúmeros casos que naturalmente surgem durante o processo de análise do efeito dominó. Um programa de computador poderia ser desenvolvido como uma ferramenta auxiliar na avaliação do efeito dominó em combinação com o código computacional de análise de conseqüências SAFETI® ou similar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Safety of and regulations for nuclear fuel cycle facilities*, 2001. (IAEA-TECDOC-1221).
2. CNEN-COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Modelo Padrão para Relatório de Análise de Segurança de Fábricas de Elementos Combustíveis*, 1980. (NE-1.09).
3. CNEN-COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Modelo Padrão para Relatório de Análise de Segurança de Usinas de Produção de Hexafluoreto de Urânio Natural*, 1980. (NE-1.11).
4. Khan, F.I.; Abbasi, S.A. Models for Domino Effect Analysis in Chemical Process Industries. *Process Safety Progress*, v. 17 n. 2, p.107-123, 1998.
5. Khan, F.I.; Abbasi, S.A. DOMIFFFECT (DOMIno eFFECT): user-friendly software for domino effect analysis. *Environmental Modelling & Software*, v.13, p. 163-177, 1998.
6. Khan, F.I.; Abbasi, S.A. 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*, v. 14, p. 283-306, 2001.
7. Cozzani, V.; Salzano, E. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials*, A 107, p. 81-94, 2004.
8. Cozzani, V.; Salzano, E. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure Part II. Case studies. *Journal of Hazardous Materials*, A107, p. 67-80, 2004.
9. Cozzani, V.; Salzano, E. Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment, *Journal of Loss Prevention in the process industries*, v. 17, p. 437-447, 2004.
10. Cozzani, V.; Gubinelli, G.; Antonioni, G.; Spadoni, G.; Zanelli, S. The Assessment of Risk caused by Domino Effect in quantitative area risk analysis, *Journal of Hazardous Materials*, 2005.
11. Gubinelli, G.; Zanelli, S.; Cozzani, V. A simplified model for the assessment of the impact probability of fragments, *Journal of Hazardous Materials*, 2004.
12. Gledhill, J.; Lines, I. *Development of methods to assess the significance of domino effects from major hazard sites*, 1998. (HSE Report WSA/RSU8000/105).

13. Vallee, A.; Bernuchon, E.; Hourtolou, D. ***Méthode pour l'Identification et la Caractérisation des effets Dominos (MICADO®)***. Paris: INERIS-INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES, Dez. 2002. (INERIS-DRA-2002-2547).
14. Bagster, D.F., Pitblado, R.M. The estimation of domino incident frequencies – an approach. *Process Safety Environment*, 69B, 196, 1991.
15. Lees, F.P. ***Loss Prevention in process industries***. 2.ed., v. 1-3, London: Butterworths, 1996.
16. DELVOSALLE, C. Domino effects phenomena: definition, overview and classification, FIRST EUROPEAN SYMPOSIUM ON DOMINO EFFECTS, Sept. 1996, Leuven (Belgium).
17. GUIAR – Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos – Universidad de Zaragoza – Apresenta texto Análisis de consecuencias – El efecto dominó. Disponível em: <http://www.unizar.es/1/GUIAR.html>.
18. THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. ***COUNCIL DIRECTIVE 96/82/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances***, Official Journal Official Journal of the European Communities L010/97, 1996.
19. Khan, F.I.; Abbasi, S.A. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, p. 361-378, 1999.
20. Visco Viera, N. M. ***Metodologia para cálculo do efeito dominó na análise de riscos de uma instalação industrial química***. 2001, Dissertação (mestrado) – Escola de Química Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
21. THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. ***COUNCIL DIRECTIVE 96/82/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances***, Official Journal of the European Communities L010/97, 1997.
22. Contini, S.; Boy, S.; Atkinson, M.; Labath, N.; Banca, M.; Nordvik, J.P. Domino effect evaluation of major industrial installations: a computer aided methodological approach. Leuven, 1996. ***Proceedings of the European Seminar on Domino Effects***.
23. Pettitt, G.N.; Schumacher, R.R. ; Seeley, L.A. Evaluating the probability of major hazardous incidents as a result of escalation events. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 6, 1997.
24. P. Latha, G. Gautam, K.V. Raghavan. Strategies for the quantification of thermally initiated cascade effects, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 5, 1992.
25. M. Morris, A. Miles, J. Copper. Quantification of escalation effects in offshore quantitative risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 7, 1994.

26. THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **ANNEX VI GENERAL CLASSIFICATION AND LABELLING REQUIREMENTS FOR DANGEROUS SUBSTANCES AND PREPARATIONS**, Official Journal of the European Communities, 2001.
27. THE EUROPEAN COMMISSION _ **Community Research_ARAMIS USER GUIDE**, 2004.
28. Van den Bosch C.J.H.; Weterings R.A.P.M. (ed). **Methods for the calculation of physical effects** “Yellow Book”. 3.ed.The Hague: Sdu Uitgevers, 1997, TNO CPR 14E (Part2).
29. Uijt de Haag, P.A.M.; Ale, B.J.M. **Guidelines for quantitative risk assessment** “Purple Book”. 1.ed. The Hague: Sdu Uitgevers, 1999, TNO CPR 18E.
30. **DTI CO₂ Sequestration Risk Assessment Appendix III Modular Frequency Analysis**. Det Norske Veritas, Apr. 2003.
31. THE EUROPEAN COMMISSION _ **Community Research_APENDIX IV Generic fault trees**, ARAMIS D1C – APPENDIX 4, 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Classificação de substâncias perigosas

Classificação de substâncias cf. *European Commision_Major Accident Hazards Bureau_Substances covered by Part I, Annex I, of the SEVESO II Directive.*

- R1 Explosivo quando seco
- R2 Risco de explosão por choque, fricção, fogo ou outras fontes de ignição
- R3 Risco extremo de explosão por choque, fricção, fogo ou outras fontes de ignição
- R4 Compostos metálicos explosivos muito sensíveis
- R5 Aquecimento pode causar uma explosão
- R6 Explosivo em contato ou não com o ar
- R7 Pode provocar incêndio
- R8 Em contato com material inflamável pode causar incêndio
- R9 Explosivo quando misturado com material combustível
- R10 Inflamável
- R11 Altamente inflamável
- R12 Extremamente inflamável
- R13 -
- R14 Reage violentamente com a água
- R15 Em contato com a água libera gases inflamáveis
- R16 Explosivo quando misturado com substâncias oxidantes
- R17 Espontaneamente inflamável no ar
- R18 Quando usado pode formar uma mistura ar/vapor explosível/inflamável
- R19 Pode formar peróxidos explosíveis
- R20 Nocivo se inalado
- R21 Nocivo em contato com a pele
- R22 Nocivo se ingerido
- R23 Tóxico se inalado
- R24 Tóxico em contato com a pele
- R25 Tóxico se ingerido
- R26 Muito tóxico se inalado
- R27 Muito tóxico em contato com a pele
- R28 Muito tóxico se ingerido
- R29 Em contato com a água libera gás tóxico
- R30 Em uso pode se tornar altamente inflamável
- R31 Em contato com ácidos libera gás tóxico
- R32 Em contato com ácidos libera gás muito tóxico
- R33 Perigo de efeitos cumulativos
- R34 Provoca queimaduras
- R35 Provoca queimaduras sérias
- R36 Irritante para os olhos
- R37 Irritante para o sistema respiratório
- R38 Irritante para a pele
- R39 Perigo de efeitos irreversíveis muito sérios
- R40 Riscos possíveis de efeitos irreversíveis

- R41 Riscos sérios de danos aos olhos
- R42 Pode causar sensibilização por inalação
- R43 Pode causar sensibilização por contato com a pele
- R44 Risco de explosão se aquecido sob confinamento
- R45 Pode causar câncer
- R46 Pode causar dano hereditário
- R47 -
- R48 Perigo de danos sérios à saúde por exposição prolongada
- R49 Pode causar câncer por inalação
- R50 Muito tóxico para organismos aquáticos
- R51 Tóxico para organismos aquáticos
- R52 Nocivo para organismos aquáticos
- R53 Pode causar efeitos adversos de longo prazo em meio aquático
- R54 tóxico para a flora
- R55 Tóxico para a fauna
- R56 Tóxico para organismos no solo
- R57 Tóxico para abelhas
- R58 Pode causar efeitos adversos de longo prazo para o meio ambiente
- R59 Perigoso para a camada de ozônio
- R60 Pode prejudicar a fertilidade
- R61 Pode causar dano a criança por nascer
- R62 Risco possível de prejuízo a fertilidade
- R63 Risco possível de dano a criança por nascer
- R64 Pode causar dano à crianças amamentadas

APÊNDICE B – FRAGMENTOS

B.1 Valor Limite de Danos por projeção de fragmentos

- Determinação do alcance máximo dos fragmentos

TABELA B.1 - Aproximação prática para uma estimativa do número de fragmentos²⁸.

Situação	Número de fragmentos
Enfraquecimento localizado	2 unidades
Sobrepessão	
Vaso cilíndrico	2 ou 3 unidades
Vaso esférico	10 ou 20 unidades

TABELA B.2 - Sugestões de forma e massa de fragmentos²⁸.

Tipo de vaso	Massa do fragmento	Forma do fragmento
Esférico com dois fragmentos	$M_V / 2$	semiesférico
Esférico com muitos fragmentos	M_V / n_f	placa
Cilíndrico com duas unidades iguais	$M_V / 2$	meio tanque
Cilíndrico com duas unidades diferentes	1 pedaço: M_{tampo} outro pedaço: $M_V - M_{\text{tampo}}$	tampo/semiesférico tanque sem um dos tampos
Cilíndrico com três unidades diferentes	2 pedaços: M_{tampo} outro: $(M_V - 2 M_{\text{tampo}})$	tampo/semiesférico placa
Cilíndrico com muitas unidades	2 pedaços: M_{tampo} o resto: $(M_V - 2 M_{\text{tampo}})/(n_f - 2)$	tampo/semiesférico tiras

TABELA B.3 - Métodos para a estimativa da velocidade do fragmento²⁸.

Tipo de explosão	Método	Etapa
Estimativa grosseira para todo tipo de explosão de vasos, com exceção de decomposição energética de materiais.	Método da energia cinética	3a
Explosão física de vaso pressurizado	Métodos de Baker e/ou de Gel'fand's	3b
Reação descontrolada, explosão interna.	Método de Gel'fand's	3b
BLEVE	Fórmula empírica de Baum's	3a
Para pressões escalares altas e decomposição de materiais energéticos	Relação empírica de Moore	3c

TABELA B.4 - Método da Energia Cinética²⁸.

Passos (cap.5 - etapa 3a)	Equações	Dados necessários
① Energia liberada E_{disp}	$E_{\text{disp}} = \frac{(p_1 - p_a) \times V_g}{\gamma_1 - 1} \text{ [J]}$	E_{disp} = energia liberada/expansão do gás comprimido [J] p_1 = pressão absoluta do gás no momento da explosão [Pa] p_a = pressão atmosférica [Pa] V_g = volume preenchido pelo gás no vaso [m ³] γ_1 = razão dos calores específicos do gás [-]
② Velocidade inicial, v_i Obs. : a estimativa grosseira da velocidade inicial pode ser muito subestimada.	$v_i = \sqrt{\frac{2 \times A_{\text{cin}} \times E_{\text{disp}}}{M_V}} \text{ [m/s]}$	E_{disp} = energia liberada [J] M_V = massa total do vaso vazio [kg] A_{cin} = fração da energia liberada transformada em energia cinética do fragmento [J]: Limite superior $A_{\text{cin}} = 0,6$ Estimativa grosseira $A_{\text{cin}} = 0,2$ BLEVE $A_{\text{cin}} = 0,04$

TABELA B.5 - Métodos de Baker e/ou Gel'fand²⁸.

Passos (cap.5 - etapa 3b)	Equações	Dados necessários
① Velocidade do som no gás a_1	$a_1^2 = \frac{T_g \gamma_1 R}{\mu_1} \text{ [m/s]}$	T_g = temperatura absoluta interna no vaso no momento da explosão [K] γ_1 = razão dos calores específicos do gás $R = 8,314 \text{ J/(mol.K)}$ μ_1 = massa molecular [kg/mol]
② Sobrepressão escalar adimensional $\bar{P}_1$ Para reações descontroladas ou explosão interna	$\bar{P}_1 = \frac{(p_1 - p_a) \times V_g}{(M_V a_1^2)}$ $\phi = \frac{\Delta H_f \times \mu_f}{a_1^3}$	p_1 = pressão absoluta do gás no momento da explosão [Pa] p_a = pressão atmosférica [Pa] V_g = volume preenchido pelo gás no vaso [m ³] M_V = massa do vaso vazio [kg] ΔH_f = calor de reação por kg de produto μ_f = velocidade de combustão laminar máxima da reação [m/s] (tabela 6.4.6)

③ Obter v_i pelas figuras

- Escolher o gráfico adequado (figuras B.1 a B.7) conforme a forma do vaso (esférico ou cilíndrico) e a relação L_V/d_V onde L_V e d_V são o comprimento e o diâmetro do vaso respectivamente;
- Escolher a linha adequada conforme o número de fragmentos n_f estimado na etapa 1 e o método de cálculo adotado (Baker ou Gel'fand) na etapa 3b;
- Obter a relação v_i/a_1 no gráfico a partir do valor $\bar{P}_1$ calculado na etapa 3b;
- Obter a velocidade inicial do fragmento v_i usando a relação v_i/a_1 e o valor de a_1 calculado na etapa 3b.

TABELA B.6 - Velocidade laminar de queima máxima para gases e vapores inflamáveis no ar em condições atmosféricas²⁸.

Gás ou vapor	Velocidade laminar de queima máxima (m/s)
Metano	0,448
etano	0,476
propano	0,464
eteno	0,735
butano	0,449
propeno	0,512
hidrogênio	3,25
cicloexano	0,440

TABELA B.7 - Método de Moore²⁸.

Passos (cap.5 – etapa 3c)	Equações	Dados necessários
① Energia liberada E_{disp}	Equação	-
② Velocidade inicial, v_i	$v_i = 1,092 \left[\frac{E_{disp} A_M}{M_V} \right]^{0,5} \quad \text{onde:}$ <p>para vasos esféricos $A_M = \frac{1}{1 + 2M_c / 5M_V}$;</p> <p>para vasos cilíndricos $A_M = \frac{1}{1 + M_c / 2M_V}$.</p>	E_{disp} = energia liberada/expansão do gás comprimido [J] M_V = massa do vaso vazio [kg] M_c = massa de gás no vaso [kg]
③ verificar v_i, com os valores calculados com outros métodos: Se a velocidade inicial v_i calculada anteriormente for maior que a obtida pela fórmula empírica de Moore, o valor desta velocidade é muito alto. Usar o valor obtido com a equação de Moore.		

TABELA B.8 - Estimativa do alcance máximo dos fragmentos projetados²⁸.

Passos (cap.5 – etapa 4)	Equações	Dados necessários
① Velocidade inicial escalar $\overline{v_i}$	$\overline{v_i} = \frac{\rho_a C_D A_D v_i^2}{M_f g} [-]$	ρ_a = densidade do ar ambiente [kg/m ³] v_i = velocidade inicial [m/s] M_f = massa do fragmento[kg] g = aceleração da gravidade [m/s ²] C_D = Coeficiente de arraste [-] A_D = área exposta num plano perpendicular à trajetória [m ²] $C_D A_D$ (tabela B.9)
② Obter o alcance máximo escalar $\overline{R_f}$ através da figura B.8	-	C_L = Coeficiente de ascensão [-] A_L = área exposta num plano paralelo à trajetória [m ²] d_v = diâmetro do fragmento [m] L_v = comprimento do fragmento [m]
② Alcance máximo $R_{f \max}$	$R_{f \max} = \frac{\overline{R_f} M_f}{\rho_a C_D A_D} [-]$	ρ_a = densidade do ar ambiente [kg/m ³] $R_{f \max}$ = alcance máximo [m] M_f = massa do fragmento[kg] C_D = Coeficiente de arraste [-] A_D = área exposta num plano perpendicular à trajetória [m ²] $C_D A_D$ (tabela B.9)

TABELA B.9 - Arraste e ascensão de fragmentos²⁸.

Forma	$C_D A_D$	$C_L A_L / C_D A_D$
Placa (com rotação)	0,585 x A_{placa}	0
Placa (sem rotação, face para cima)	1,17 x A_{placa}	0
Placa (sem rotação, borda para cima)	0,1 x A_{placa}	0 a 10 ⁽¹⁾
Semiesfera (com rotação)	0,615 x $\pi/4 \times d_v^2$	0
Semiesfera (sem rotação)	0,47 x $\pi/4 \times d_v^2$	0
Meio tanque (projeção vertical)	0,47 x $\pi/4 \times d_v^2$	0
Cilindro (borda para cima)	1,20 x $d_v \times L_v$	0
Tira (com rotação)	0,99 x A_{tira}	0

(1) os valores dependem do ângulo da placa. Usar o valor que fornece o maior alcance do fragmento ou calcular o número de possíveis alcances.

A determinação do alcance máximo do fragmento garante a possibilidade ou não de ocorrência do impacto do fragmento com o equipamento secundário mas não determina o estado de dano e a intensidade de perda no equipamento secundário. No presente trabalho será adotado estado de dano ED2 e intensidade de perda IP3 como consequência do impacto do fragmento com o equipamento alvo.

Se a probabilidade de ocorrência do evento secundário for suficientemente alta então cenários acidentais apropriados serão desenvolvidos e suas consequências analisadas (tabelas 5.4.2 e 5.4.3). Essas consequências podem, do mesmo modo, gerar um ou mais eventos acidentais terciários em equipamentos alvos terciários dando continuidade à propagação de acidentes.

FIGURA B.1 – Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos esféricos contendo gás ideal

FIGURA B.2 – Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com $L_v/d_v=5$ contendo gás ideal²⁸

FIGURA B.3 – Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com $L_v/d_v=10$ contendo gás ideal.²⁸

FIGURA B.4 – Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos esféricos com ruptura devida a reações químicas fora de controle.²⁸

FIGURA B.5 – Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com ruptura devida a reações químicas fora de controle. e com $L_v/d_v=5$.²⁸

FIGURA B.6 – Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com ruptura devida a reações químicas fora de controle. e com $L_v/d_v=10$.²⁸

FIGURA B.7 – Previsão de alcance de fragmentos.²⁸

- Determinação da probabilidade do impacto de um fragmento

Uma técnica simples foi desenvolvida por *G. Gubinelli, S. Zanelli, V. Cozzani*¹¹, baseada em equações simples oriundas da mecânica para o movimento de objetos com velocidades subsônicas:

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{dt^2} + k\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 &= 0 \\ \frac{d^2y}{dt^2} + (-1)^n k\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + g &= 0\end{aligned}\tag{B.1}$$

onde x e y são as coordenadas da posição do fragmento no instante t , g a aceleração da gravidade, k o fator de arraste, $n=1$ na subida da trajetória e $n=2$ na sua descida.

A figura B.8 representa a condição de um possível impacto entre um fragmento F de massa, forma e velocidade inicial $\mathbf{u}$ definidas e um alvo. O ponto O , representa a posição inicial do centro de massa do fragmento gerado (ou posição do vaso de pressão que sofre o primeiro acidente) e é assumido como origem do sistema de referência absoluto $x'y'z'$ com o plano $x'z'$ paralelo ao solo e o eixo y' na direção oposta a aceleração gravitacional g . O vetor unitário $\mathbf{d}$ com os ângulos direcionais θ e φ representa a direção inicial do fragmento.

Os passos para o cálculo da Probabilidade de impacto do fragmento são:

① Fator de arraste k

O fator de arraste k é obtido pela equação:

$$k = \frac{C_D A_D}{M_F}\tag{B.2}$$

onde

C_D = Coeficiente de arraste [-];

A_D = área exposta num plano perpendicular à trajetória [m^2];

$C_D A_D$ (tabela B.9);

M_F = massa do fragmento [kg].

② Fator PI

O fator PI é obtido pela equação:

$$PI = z_1 \times \frac{R_{f \min}}{R_{f \max}} + z_2 \times \left(\frac{R_{f \min}}{R_{f \max}} \right)^{20} + (0,5 - z_1 - z_2) \times \exp \left[z_3 \times \frac{R_{f \min} - R_{f \max}}{R_{f \min}} \right] \quad (B.3)$$

onde

$R_{f \min}$ = alcance mínimo [m];

$R_{f \min} = D - R$ cf. figura B.8;

$R_{f \max}$ = alcance máximo [m] cf. Etapa 4 item 5.4;

z_1, z_2 e z_3 = parâmetros obtidos pelos gráficos B.9 a, b, c

u = velocidade inicial do fragmento [m/s].

③ Probabilidade de impacto do fragmento

A probabilidade de impacto do fragmento é obtida pela equação:

$$P_{\text{imp},F}(k,u) \cong \frac{\Delta\theta}{2\pi} [0,5 - PI] \quad (B.4)$$

onde $\Delta\theta$ = angulo de impacto ver figura B.8.

FIGURA 6.5.1 – Representação de um fragmento e seu impacto num alvo.

FIGURA B.9 – Valores dos parâmetros z_1 , z_2 e z_3 ¹¹

APÊNDICE C – ANÁLISE DE CONSEQUÊNCIAS

C.1 ANÁLISE DE VULNERABILIDADE CAUSADOS POR INCÊNDIOS E EXPLOSÕES

- Dados necessários à quantificação dos eventos acidentais primários

1) Características dos equipamentos

Vaso	H (m)	h (m)	D (m)	L (m)	Z (m)	Peso estimado (kg)
VP-001	0,75	0,5	2,134	13,678	1,57	7.855
VP-002	0,75	0,5	1,041	4,880	1,02	1.047
VP-003	0,75	0,5	1,041	4,880	1,02	1.047
VP-004	0,75	0,5	1,168	7,320	1,08	1.849
VP-007	0,75	0,5	1,200	7,400	1,10	2,774

FIGURA C.1.1 - Características dos vasos cilíndricos horizontais

Vaso	H (m)	h (m)	D (m)	A (m)	Z (m)	Peso estimado (kg)
VP-005	0,75	0,50	1,759	5,350	3,18	11.350
VP-006	0,75	0,50	1,759	5,350	3,18	11.350

FIGURA C.1.2 - Características dos vasos cilíndricos verticais

Vaso	H (m)	h (m)	A (m)	L (m)	l (m)	Z (m)
VA-001	0,5	0,5	1,600	1,930	1,370	1,30
VA-002	0,5	0,5	1,600	1,930	1,370	1,30

FIGURA C.1.3 - Características dos vasos de metanol

2) Posição dos equipamentos

TABELA C.1.1 – Coordenadas dos equipamentos (origem no centro do vaso VP-001)

Vaso	X	Y	Z
VA-001	-20,00	20,00	1,30
VA-002	-23,00	20,00	1,30
VP-001	0,00	0,00	1,57
VP-002	0,00	20,00	1,02
VP-003	0,00	23,00	1,02
VP-004	0,00	26,00	1,08
VP-005	-20,00	26,00	3,18
VP-006	-23,00	26,00	3,18
VP-007	-20,00	0,00	1,10

3) Condições de dispersão atmosféricas

TABELA C.1.2 – Dados meteorológicos do sítio.

Temperatura média do ar	20,0 °C
Pressão atmosférica	1,0 atm
Umidade relativa do ar	80 %
Classes de estabilidade atmosféricas	Categoria E: Estável
	Categoria D: Neutra
Direções e velocidades do vento	0°: E 3,5 m/s
	30°: D 5,0 m/s
	90°: D 5,0 m/s

- Resultados conforme indicado com detalhes nos itens 5.3 e 6.3

TABELA C.1.3 – Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / E 3,5m/s_direção do vento = 0°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na poça (kg) (*)	Diâmetro da poça (m) (*)	Tempo de combustão da poça (s) (*)	Potência Emissiva da chama (kW/m ²) (*)
VP-001	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido			Amônia	Formação de poça	Poça e Ignição	Incêndio de poça	Radiação	13.381,89	49,19	522,73	170,00
Direção do vento α (°)	Coordenadas do centro da poça P			Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Centro da Poça (m)	Radiação Incidente (kW/m ²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _{ff}) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)
	X	Y	Z									
0	0,00	0,00	0,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários		
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)
VP-002	0,00	20,00	1,02	Pressurizado	20,026	170,00	77,93	4,49	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-003	0,00	23,00	1,02	Pressurizado	23,023	170,00	77,93	4,49	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-004	0,00	26,00	1,08	Pressurizado	26,022	144,36	111,88	3,83	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-005	-20,00	26,00	3,18	Pressurizado	32,956	51,78	348,26	1,73	ED2, IP3	BLEVE	-	-
VP-006	-23,00	26,00	3,18	Pressurizado	34,858	43,93	406,93	1,44	ED2, IP3	BLEVE	-	-
VP-007	-20,00	0,00	1,10	Pressurizado	20,030	170,00	98,89	4,05	ED2, IP3	EF	ENV	INV
VA-001	-20,00	20,00	1,30	Atmosférico	28,314	63,03	181,80	2,93	ED2, IP3	IPo	ENV	INV
VA-002	-23,00	20,00	1,30	Atmosférico	30,507	51,90	226,34	2,53	ED2, IP3	IPo	ENV	INV

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.4 – Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / D 5,0m/s_direção do vento = 30°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na poça (kg) (*)	Diâmetro da poça (m)	Tempo de combustão da poça (s) (*)	Potência Emissiva da chama (kW/m ²) (*)						
VP-001	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido			Amônia	Formação de poça	Poça e Ignição	Incêndio de poça	Radiação	13.188,02	48,78	523,96	170,00						
Coordenadas do centro da poça P				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Centro da Poça (m)	Radiação Incidente (kW/m ²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _{fr}) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y	Z															
30	0,00	0,00	0,00															
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários								
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)						
VP-002	10,00	17,32	1,02							Pressurizado	20,026	170,00	77,93	4,49	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-003	11,50	19,92	1,02							Pressurizado	23,023	170,00	77,93	4,49	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-004	13,00	22,52	1,08							Pressurizado	26,022	164,28	98,99	4,05	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-005	-4,32	32,52	3,18							Pressurizado	32,956	70,38	260,42	2,27	ED2, IP3	BLEVE	-	-
VP-006	-6,92	34,02	3,18							Pressurizado	34,858	56,14	322,59	1,87	ED2, IP3	BLEVE	-	-
VP-007	-17,32	10,00	1,10							Pressurizado	20,030	170,00	98,89	4,05	ED2, IP3	EF	ENV	INV
VA-001	-7,32	27,32	1,30							Atmosférico	28,314	81,68	135,71	3,47	ED2, IP3	IPo	-	-
VA-002	-9,92	28,82	1,30							Atmosférico	30,507	63,85	179,17	2,96	ED2, IP3	IPo	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.5 – Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / D 5,0m/s_direção do vento = 90°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na poça (kg) (*)	Diâmetro da poça (m) (*)	Tempo de combustão da poça (s) (*)	Potência Emissiva da chama (kW/m ²) (*)						
VP-001	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido			Amônia	Formação de poça	Poça e Ignição	Incêndio de poça	Radiação	13.188,02	48,78	523,96	170,00						
Coordenadas do centro da poça P				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Centro da Poça (m)	Radiação Incidente (kW/m ²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _f) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y	Z															
90	0,00	0,00	0,00															
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários								
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)						
VP-002	20,00	0,00	1,02							Pressurizado	20,026	170,00	77,93	4,49	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-003	23,00	0,00	1,02							Pressurizado	23,023	170,00	77,93	4,49	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-004	26,00	0,00	1,08							Pressurizado	26,022	140,96	114,44	3,79	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-005	26,00	20,00	3,18							Pressurizado	32,956	115,58	162,80	3,13	ED2, IP3	BLEVE	-	-
VP-006	26,00	23,00	3,18							Pressurizado	34,858	103,30	181,07	2,94	ED2, IP3	BLEVE	-	-
VP-007	0,00	20,00	1,10							Pressurizado	20,030	170,00	98,89	4,05	ED2, IP3	EF	ENV	INV
VA-001	20,00	20,00	1,30							Atmosférico	28,314	130,94	79,69	4,45	ED2, IP3	IPo	-	-
VA-002	20,00	23,00	1,30							Atmosférico	30,507	114,19	93,00	4,17	ED2, IP3	IPo	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.6 – Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / E 3,5m/s_direção do vento = 0°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Comprimento da chama (m) (*)	Potência Emissiva da chama (kW/m²) (*)	Tempo de combustão do jato (s) (*)	
VP-001	Vazamento líquido numa tubulação			Amônia	Jato bifásico	Jato bifásico e ignição	Jato de Fogo	Radiação	12,23	153,03	13.188,13	
Coordenadas do furo F				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Furo (m)	Radiação Incidente (kW/m²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _f) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y	Z									
0	0,00	9,63	3,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários		
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)
VP-002	0,00	10,37	1,02	Pressurizado	10,557	2,80	3.806,22	0,00	-	-	-	-
VP-003	0,00	13,37	1,02	Pressurizado	13,516	2,00	5.234,53	0,00	-	-	-	-
VP-004	0,00	16,37	1,08	Pressurizado	16,482	1,47	8.616,01	0,00	-	-	-	-
VP-005	-20,00	16,37	3,18	Pressurizado	25,846	0,28	48.837,43	-	-	-	-	-
VP-006	-23,00	16,37	3,18	Pressurizado	28,231	0,22	61.367,32	-	-	-	-	-
VP-007	-20,00	-9,63	1,10	Pressurizado	22,279	0,24	49.470,64	-	-	-	-	-
VA-001	-20,00	10,37	1,30	Atmosférico	20,086	0,25	93.025,42	-	-	-	-	-
VA-002	-23,00	10,37	1,30	Atmosférico	23,075	0,19	126.778,00	-	-	-	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.7 – Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / D 5,0m/s_direção do vento = 30°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Comprimento da chama (m) (*)	Potência Emissiva da chama (kW/m²) (*)	Tempo de combustão do jato (s) (*)																															
VP-001	Vazamento líquido numa tubulação			Amônia	Jato bifásico	Jato bifásico e ignição	Jato de Fogo	Radiação	12,23	153,03	13.188,13																															
Coordenadas do furo F				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Furo (m)	Radiação Incidente (kW/m²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _f) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)	<div> <p>Possíveis cenários secundários</p><table><tr><th>(1)</th><th>(2)</th><th>(3)</th></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr></table></div>			(1)	(2)	(3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(1)	(2)	(3)																																								
-	-	-																																								
-	-	-																																								
-	-	-																																								
-	-	-																																								
-	-	-																																								
-	-	-																																								
-	-	-																																								
-	-	-																																								
-	-	-																																								
Direção do vento α (°)	X	Y	Z																																							
30	0,00	9,63	3,00																																							
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso																																									
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}																																							
VP-002	5,19	8,98	1,02	Pressurizado	10,557	5,37	2.054,32	0,00	-	-	-	-																														
VP-003	6,69	11,58	1,02	Pressurizado	13,516	3,51	3.072,89	0,00	-	-	-	-																														
VP-004	8,19	14,18	1,08	Pressurizado	16,482	2,36	5.503,11	0,00	-	-	-	-																														
VP-005	-9,14	24,18	3,18	Pressurizado	25,846	0,50	28.202,45	-	-	-	-	-																														
VP-006	-11,73	25,68	3,18	Pressurizado	28,231	0,40	34.838,59	-	-	-	-	-																														
VP-007	-22,14	1,66	1,10	Pressurizado	22,279	0,10	113.346,37	-	-	-	-	-																														
VA-001	-12,14	18,98	1,30	Atmosférico	15,414	0,51	41.623,52	-	-	-	-	-																														
VA-002	-14,73	20,48	1,30	Atmosférico	18,377	0,40	54.746,24	-	-	-	-	-																														

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.8 – Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / D 5,0m/s_direção do vento = 90°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Comprimento da chama (m) (*)	Potência Emissiva da chama (kW/m²) (*)	Tempo de combustão do jato (s) (*)	
VP-001	Vazamento líquido numa tubulação			Amônia	Jato bifásico	Jato bifásico e ignição	Jato de Fogo	Radiação	12,23	153,03	13.188,13	
Coordenadas do furo F				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Furo (m)	Radiação Incidente (kW/m²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _{ff}) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y	Z									
90	0,00	9,63	3,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários		
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)
VP-002	10,37	0,00	1,02	Pressurizado	10,557	38,02	321,87	1,88	ED2, IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-003	13,37	0,00	1,02	Pressurizado	13,516	7,86	1.432,15	0,00	-	-	-	-
VP-004	16,37	0,00	1,08	Pressurizado	16,482	2,05	6.288,18	0,00	-	-	-	-
VP-005	16,37	20,00	3,18	Pressurizado	25,846	0,91	15.995,55	-	-	-	-	-
VP-006	16,37	23,00	3,18	Pressurizado	28,231	0,73	19.708,10	-	-	-	-	-
VP-007	-9,63	20,00	1,10	Pressurizado	22,279	0,59	21.106,23	-	-	-	-	-
VA-001	10,37	20,00	1,30	Atmosférico	14,764	1,16	16.472,87	-	-	-	-	-
VA-002	10,37	23,00	1,30	Atmosférico	17,005	0,89	22.210,89	-	-	-	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.9 – Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / E 3,5m/s_direção do vento = 0°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)	Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na nuvem (kg) (*)	Distância do centro da nuvem na direção do vento (m) (*)	Altura do centro da nuvem (m) (*)			
VP-001	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido	Amônia	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de Nuvem de Vapor (ENV)	Sobrepresão	3.257,00	15,28	0,00			
Coordenadas do centro da nuvem no instante da explosão			Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Centro da nuvem	Sobrepresão Incidente (kPa) (*)	Probit (Y) (**)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y										Z
0	15,28	0,00										0,00
	X_vento	Y_vento										Z_vento
	15,28	0,00							0,00			
Vaso Alvo	Coordenadas do vaso								Possíveis cenários secundários			
(VAL)	X_vento	Y_vento	Z	(1)	(2)	(3)						
VP-002	0,00	20,00	1,02	Pressurizado	25,190	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-003	0,00	23,00	1,02	Pressurizado	27,632	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-004	0,00	26,00	1,08	Pressurizado	30,177	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-005	-20,00	26,00	3,18	Pressurizado	43,941	71,00	5,93	ED2	IP3	BLEVE	-	-
VP-006	-23,00	26,00	3,18	Pressurizado	46,384	64,00	5,48	ED2	IP3	BLEVE	-	-
VP-007	-20,00	0,00	1,10	Pressurizado	35,297	100,00	7,41	ED2	IP3	EF	ENV	INV
VA-001	-20,00	20,00	1,30	Atmosférico	40,575	81,00	8,62	ED2	IP3	IPo	-	-
VA-002	-23,00	20,00	1,30	Atmosférico	43,209	73,00	8,36	ED2	IP3	IPo	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.10 – Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / D 5,0m/s_direção do vento = 30°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na nuvem (kg) (*)	Distância do centro da nuvem na direção do vento (m) (*)	Altura do centro da nuvem (m) (*)	
VP-001	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido			Amônia	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de Nuvem de Vapor (ENV)	Sobrepressão	3.257,00	19,58	0,00	
Coordenadas do centro da nuvem no instante da explosão				Tipo de Vaso	Distancia Vaso Alvo_Centro da nuvem (m)	Sobrepressão Incidente (kPa) (*)	Probit (Y) (**)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y	Z									
30	19,58	0,00	0,00									
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}									
	19,58	0,00	0,00									
Vaso Alvo	Coordenadas do vaso			Possíveis cenários secundários								
(VAL)	X _{vento}	Y _{vento}	Z							(1)	(2)	(3)
VP-002	10,00	17,32	1,02	Pressurizado	19,820	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-003	11,50	19,92	1,02	Pressurizado	21,519	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-004	13,00	22,52	1,08	Pressurizado	23,483	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-005	-4,32	32,52	3,18	Pressurizado	40,481	82,00	6,55	ED2	IP3	BLEVE	-	-
VP-006	-6,92	34,02	3,18	Pressurizado	43,237	73,00	6,05	ED2	IP3	BLEVE	-	-
VP-007	-17,32	10,00	1,10	Pressurizado	38,247	90,00	6,95	ED2	IP3	EF	ENV	INV
VA-001	-7,32	27,32	1,30	Atmosférico	38,363	90,00	8,87	ED2	IP3	IPo	-	-
VA-002	-9,92	28,82	1,30	Atmosférico	41,261	79,00	8,56	ED2	IP3	IPo	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.11 – Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / D 5,0m/s_direção do vento = 90°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)	Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na nuvem (kg) (*)	Distância do centro da nuvem na direção do vento (m) (*)	Altura do centro da nuvem (m) (*)			
VP-001	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido	Amônia	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de Nuvem de Vapor (ENV)	Sobrepresão	3.257,00	19,58	0,00			
Coordenadas do centro da nuvem no instante da explosão			Tipo de Vaso	Distancia Vaso Alvo_Centro da nuvem (m)	Sobrepresão Incidente (kPa) (*)	Probit (Y) (**)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y										Z
90	19,58	0,00										0,00
	X _{vento}	Y _{vento}										Z _{vento}
	19,58	0,00										0,00
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso			Possíveis cenários secundários								
	X _{vento}	Y _{vento}	Z							(1)	(2)	(3)
VP-002	20,00	0,00	1,02	Pressurizado	1,103	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-003	23,00	0,00	1,02	Pressurizado	3,569	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-004	26,00	0,00	1,08	Pressurizado	6,510	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-005	26,00	20,00	3,18	Pressurizado	21,245	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE	-	-
VP-006	26,00	23,00	3,18	Pressurizado	24,090	100,00	7,41	ED2	IP3	BLEVE	-	-
VP-007	0,00	20,00	1,10	Pressurizado	28,010	100,00	7,41	ED2	IP3	EF	ENV	INV
VA-001	20,00	20,00	1,30	Atmosférico	20,047	100,00	9,13	ED2	IP3	IPo	-	-
VA-002	20,00	23,00	1,30	Atmosférico	23,041	100,00	9,13	ED2	IP3	IPo	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.12 – Análise de vulnerabilidade / BLEVE_Sobrepessão / E 3,5m/s - D 5,0m/s

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância no vaso (kg)
VP-001	Ruptura Catastrófica			Amônia	Ruptura Catastrófica	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	Sobrepessão	21.101,00			
0	Coordenadas do centro da explosão C			Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Centro da explosão (m)	Sobrepessão Incidente (kPa) (*)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Probit (Y) (**)	Possíveis cenários secundários		
	X	Y	Z									
	0,00	0,00	1,57									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso											
	X	Y	Z							(1)	(2)	(3)
VP-002	0,00	20,00	1,02	Pressurizado	20,008	100,00	ED2	IP3	7,41	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-003	0,00	23,00	1,02	Pressurizado	23,007	77,00	ED2	IP3	6,28	BLEVE/BF	ENV	INV
VP-004	0,00	26,00	1,08	Pressurizado	26,005	61,00	ED2	IP2	5,27	JF	ENV	INV
VP-005	-20,00	26,00	3,18	Pressurizado	32,842	40,00	ED2	IP2	3,44	JG	-	-
VP-006	-23,00	26,00	3,18	Pressurizado	34,750	36,00	ED1	IP1	2,99	JG	-	-
VP-007	-20,00	0,00	1,10	Pressurizado	20,006	100,00	ED2	IP3	7,41	EF	ENV	INV
VA-001	-20,00	20,00	1,30	Atmosférico	28,286	52,00	ED2	IP3	7,54	IPo	-	-
VA-002	-23,00	20,00	1,30	Atmosférico	30,481	46,00	ED2	IP3	7,24	IPo	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.13 – Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / E 3,5m/s_direção do vento = 0°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na poça (kg) (*)	Diâmetro da poça (m)	Tempo de combustão da poça (s) (*)	Potência Emissiva da chama (kW/m ²)
VP-003	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido			Propano	Formação de poça	Poça e Ignição	Incêndio de poça	Radiação	754,05	12,79	49,00	158,47
Coordenadas do centro da poça P				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Centro da Poça (m)	Radiação Incidente (kW/m ²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _f) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidad e de Perda
Direção do vento α (°)	X	Y	Z									
0	0,00	23,00	0,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários		
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)
VP-001	0,00	-23,00	1,57	Pressurizado	23,054	17,47	672,20	-	-	-	-	-
VP-002	0,00	-3,00	1,02	Pressurizado	3,169	158,47	83,29	-	-	-	-	-
VP-004	0,00	3,00	1,08	Pressurizado	3,188	158,47	102,42	-	-	-	-	-
VP-005	-20,00	3,00	3,18	Pressurizado	20,472	13,35	1.257,13	-	-	-	-	-
VP-006	-23,00	3,00	3,18	Pressurizado	23,412	10,74	1.544,72	-	-	-	-	-
VP-007	-20,00	-23,00	1,10	Pressurizado	30,499	7,59	1.878,53	-	-	-	-	-
VA-001	-20,00	-3,00	1,30	Atmosférico	20,265	11,83	1.199,92	-	-	-	-	-
VA-002	-23,00	-3,00	1,30	Atmosférico	23,231	9,82	1.480,39	-	-	-	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.14 – Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / D 5,0m/s_direção do vento = 30°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na poça (kg) (*)	Diâmetro da poça (m)	Tempo de combustão da poça (s) (*)	Potência Emissiva da chama (kW/m²) (*)
VP-003	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido			Propano	Formação de poça	Poça e Ignição	Incêndio de poça	Radiação	748,16	12,73	49,09	158,44
Coordenadas do centro da poça P				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Centro da Poça (m)	Radiação Incidente (kW/m²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _f) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidad e de Perda
Direção do vento α (°)	X	Y	Z									
30	0,00	23,00	0,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários		
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)
VP-001	-11,50	-19,92	1,57	Pressurizado	23,054	12,15	948,11	-	-	-	-	-
VP-002	-1,50	-2,60	1,02	Pressurizado	3,169	158,44	83,31	-	-	-	-	-
VP-004	1,50	2,60	1,08	Pressurizado	3,188	158,44	102,44	-	-	-	-	-
VP-005	-15,82	12,60	3,18	Pressurizado	20,472	13,67	1.229,25	-	-	-	-	-
VP-006	-18,42	14,10	3,18	Pressurizado	23,412	10,94	1.517,97	-	-	-	-	-
VP-007	-28,82	-9,92	1,10	Pressurizado	30,499	5,89	2.388,41	-	-	-	-	-
VA-001	-18,82	7,40	1,30	Atmosférico	20,265	11,14	1.284,08	-	-	-	-	-
VA-002	-21,42	8,90	1,30	Atmosférico	23,231	9,13	1.607,19	-	-	-	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.15 – Análise de vulnerabilidade / Incêndio de poça / D 5,0m/s_direção do vento = 90°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na poça (kg) (*)	Diâmetro da poça (m)	Tempo de combustão da poça (s) (*)	Potência Emissiva da chama (kW/m²) (*)
VP-003	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido			Propano	Formação de poça	Poça e Ignição	Incêndio de poça	Radiação	748,16	12,73	49,09	158,44
Coordenadas do centro da poça P				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Centro da Poça (m)	Radiação Incidente (kW/m²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _f) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y	Z									
90	0,00	23,00	0,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários		
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)
VP-001	-23,00	0,00	1,57	Pressurizado	23,054	8,95	1.266,42	-	-	-	-	-
VP-002	-3,00	0,00	1,02	Pressurizado	3,169	158,44	83,31	-	-	-	-	-
VP-004	3,00	0,00	1,08	Pressurizado	3,188	158,44	102,44	-	-	-	-	-
VP-005	3,00	20,00	3,18	Pressurizado	20,472	25,44	682,63	-	-	-	-	-
VP-006	3,00	23,00	3,18	Pressurizado	23,412	19,99	857,71	-	-	-	-	-
VP-007	-23,00	20,00	1,10	Pressurizado	30,499	6,64	2.132,13	-	-	-	-	-
VA-001	-3,00	20,00	1,30	Atmosférico	20,265	17,85	754,45	-	-	-	-	-
VA-002	-3,00	23,00	1,30	Atmosférico	23,231	14,74	936,30	-	-	-	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.16 – Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / E 3,5m/s_direção do vento = 0°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Comprimento da chama (m)	Potência Emissiva da chama	Tempo de combustão do jato (s)	
VP-003	Vazamento líquido numa tubulação			Propano	Jato bifásico	Jato bifásico e ignição	Jato de Fogo	Radiação	11,28	228,67	2.461,11	
Coordenadas do furo F				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Furo (m)	Radiação Incidente (kW/m ²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _{ff}) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)	Possíveis cenários secundários		
Direção do vento α (°)	X	Y	Z									
0	0,00	24,04	2,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso											
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)
VP-001	0,00	-24,04	1,57	Pressurizado	24,044	0,98	10.286,36	-	-	-	-	-
VP-002	0,00	-4,04	1,02	Pressurizado	4,157	9,64	1.180,41	0,00	-	-	-	-
VP-004	0,00	1,96	1,08	Pressurizado	2,165	13,68	1.042,03	0,00	-	-	-	-
VP-005	-20,00	1,96	3,18	Pressurizado	20,130	0,15	88.196,84	-	-	-	-	-
VP-006	-23,00	1,96	3,18	Pressurizado	23,114	0,12	108.949,89	-	-	-	-	-
VP-007	-20,00	-24,04	1,10	Pressurizado	31,285	0,34	35.571,08	-	-	-	-	-
VA-001	-20,00	-4,04	1,30	Atmosférico	34,482	0,19	126.778,00	-	-	-	-	-
VA-002	-23,00	-4,04	1,30	Atmosférico	36,304	0,14	178.914,49	-	-	-	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.17 – Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / D 5,0m/s_direção do vento = 30°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Comprimento da chama (m)	Potência Emissiva da chama	Tempo de combustão do jato (s)	
VP-003	Vazamento líquido numa tubulação			Propano	Jato bifásico	Jato bifásico e ignição	Jato de Fogo	Radiação	11,28	228,67	2.461,11	
Coordenadas do furo F				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Furo (m)	Radiação Incidente (kW/m ²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _{ff}) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y	Z									
30	0,00	24,04	2,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários		
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)
VP-001	-12,02	-20,82	1,57	Pressurizado	24,044	0,63	15.630,67	-	-	-	-	-
VP-002	-2,02	-3,50	1,02	Pressurizado	4,157	5,33	2.068,91	0,00	-	-	-	-
VP-004	0,98	1,70	1,08	Pressurizado	2,165	26,50	557,11	0,86	ED2, IP3	BLEVE	ENV	INV
VP-005	-16,34	11,70	3,18	Pressurizado	20,130	0,50	28.202,45	-	-	-	-	-
VP-006	-18,94	13,20	3,18	Pressurizado	23,114	0,39	35.683,98	-	-	-	-	-
VP-007	-29,34	-10,82	1,10	Pressurizado	31,285	0,15	77.205,67	-	-	-	-	-
VA-001	-19,34	6,50	1,30	Atmosférico	26,118	0,27	85.290,30	-	-	-	-	-
VA-002	-21,94	8,00	1,30	Atmosférico	27,185	0,24	97.409,13	-	-	-	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.18 – Análise de vulnerabilidade / Jato de fogo / D 5,0m/s_direção do vento = 90°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Comprimento da chama (m)	Potência Emissiva da chama	Tempo de combustão do jato (s)	
VP-003	Vazamento líquido numa tubulação			Propano	Jato bifásico	Jato bifásico e ignição	Jato de Fogo	Radiação	11,28	228,67	2.461,11	
Coordenadas do furo F				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo_Furo (m)	Radiação Incidente (kW/m ²) (*)	Tempo de falha do Vaso Alvo (t _f) (s) (**)	Probit (Y) (***)	Estado de Dano (ED) e Intensidade de Perda (IP)
Direção do vento α (°)	X	Y	Z									
90	0,00	24,04	2,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									Possíveis cenários secundários		
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							(1)	(2)	(3)
VP-001	-24,04	0,00	1,57	Pressurizado	24,044	0,09	98.692,78	-	-	-	-	-
VP-002	-4,04	0,00	1,02	Pressurizado	4,157	1,48	6.961,70	-	-	-	-	-
VP-004	1,96	0,00	1,08	Pressurizado	2,165	89,93	175,15	3,00	ED2, IP3	BLEVE	ENV	INV
VP-005	1,96	20,00	3,18	Pressurizado	20,130	1,48	10.091,92	-	-	-	-	-
VP-006	1,96	23,00	3,18	Pressurizado	23,114	1,13	13.030,05	-	-	-	-	-
VP-007	-24,04	20,00	1,10	Pressurizado	31,285	0,27	44.249,27	-	-	-	-	-
VA-001	-4,04	20,00	1,30	Atmosférico	5,756	1,11	17.312,25	-	-	-	-	-
VA-002	-4,04	23,00	1,30	Atmosférico	4,230	0,90	21.932,72	-	-	-	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.4.4 (***) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.19 – Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / E 3,5m/s_direção do vento = 0°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na nuvem (kg) (*)	Distância do centro da nuvem na direção do vento (m) (*)	Altura do centro da nuvem (m) (*)	
VP-003	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido			Propano	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de Nuvem de Vapor (ENV)	Sobrepresão	437,00	30,54	0,00	
Coordenadas do centro da nuvem no instante da explosão				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo centro da nuvem (m)	Sobrepresão Incidente (kPa) (*)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Probit (Y) (**)
α (°)	X	Y	Z									
0	30,54	23,00	0,00									
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}							Possíveis cenários secundários		
	30,54	0,00	0,00									
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso											
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}									
VP-001	0,00	-23,00	1,57	Pressurizado	38,264	48,00	ED2	IP2	4,23	JF	ENV	INV
VP-002	0,00	-3,00	1,02	Pressurizado	30,704	70,00	ED2	IP3	5,87	BLEVE	ENV	INV
VP-004	0,00	3,00	1,08	Pressurizado	30,706	70,00	ED2	IP3	5,87	BLEVE	ENV	INV
VP-005	-20,00	3,00	3,18	Pressurizado	50,729	30,00	-	-	-	-	-	-
VP-006	-23,00	3,00	3,18	Pressurizado	53,718	27,00	-	-	-	-	-	-
VP-007	-20,00	-23,00	1,10	Pressurizado	55,538	25,00	-	-	-	-	-	-
VA-001	-20,00	-3,00	1,30	Atmosférico	50,646	30,00	ED2	IP3	6,19	IPo	-	-
VA-002	-23,00	-3,00	1,30	Atmosférico	53,640	27,00	ED2	IP3	5,94	IPo	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.20 – Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / D 5,0/s_direção do vento = 30°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)	Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na nuvem (kg) (*)	Distância do centro da nuvem na direção do vento (m) (*)	Altura do centro da nuvem (m) (*)			
VP-003	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido	Propano	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de Nuvem de Vapor (ENV)	Sobrepresão	437,00	44,08	0,00			
Coordenadas do centro da nuvem no instante da explosão			Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo centro da nuvem (m)	Sobrepresão Incidente (kPa) (*)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Probit (Y) (**)	Possíveis cenários secundários			
α (°)	X	Y										Z
30	44,08	23,00										0,00
	X _{vento}	Y _{vento}										Z _{vento}
	44,08	0,00										0,00
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso								(1)	(2)	(3)	
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}									
VP-001	-11,50	-19,92	1,57	Pressurizado	59,062	23,00	-	-	-	-	-	-
VP-002	-1,50	-2,60	1,02	Pressurizado	45,665	35,00	ED1	IP1	2,87	JF	-	-
VP-004	1,50	2,60	1,08	Pressurizado	42,673	40,00	ED2	IP2	3,44	JF	ENV	INV
VP-005	-15,82	12,60	3,18	Pressurizado	61,294	22,00	-	-	-	-	-	-
VP-006	-18,42	14,10	3,18	Pressurizado	64,148	20,00	-	-	-	-	-	-
VP-007	-28,82	-9,92	1,10	Pressurizado	73,580	16,00	-	-	-	-	-	-
VA-001	-18,82	7,40	1,30	Atmosférico	63,348	21,00	ED2	IP3	5,32	IPo	-	-
VA-002	-21,42	8,90	1,30	Atmosférico	66,114	19,00	ED2	IP2	5,08	IPo	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.21 – Análise de vulnerabilidade / Explosão de nuvem de vapor / D 5,0m/s_direção do vento = 90°

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)	Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância na nuvem (kg) (*)	Distância do centro da nuvem na direção do vento (m) (*)	Altura do centro da nuvem (m) (*)			
VP-003	Furo no casco de 50 mm_Lado líquido	Propano	Formação de poça	Dispersão gasosa	Explosão de Nuvem de Vapor (ENV)	Sobrepressão	437,00	44,08	0,00			
Coordenadas do centro da nuvem no instante da explosão			Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo centro da nuvem (m)	Sobrepressão Incidente (kPa) (*)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Probit (Y) (**)
α (°)	X	Y										Z
90	44,08	23,00										0,00
	X _{vento}	Y _{vento}										Z _{vento}
	44,08	0,00										0,00
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso								Possíveis cenários secundários			
	X _{vento}	Y _{vento}	Z _{vento}						(1)	(2)	(3)	
VP-001	-23,00	0,00	1,57	Pressurizado	67,098	19,00	-	-	-	-	-	
VP-002	-3,00	0,00	1,02	Pressurizado	47,091	33,00	ED1	IP1	2,61	JF	-	
VP-004	3,00	0,00	1,08	Pressurizado	41,094	42,00	ED2	IP2	3,65	JF	ENV	
VP-005	3,00	20,00	3,18	Pressurizado	45,800	35,00	ED1	IP1	2,87	JG	-	
VP-006	3,00	23,00	3,18	Pressurizado	47,188	33,00	ED1	IP1	2,61	JG	-	
VP-007	-23,00	20,00	1,10	Pressurizado	70,007	18,00	-	-	-	-	-	
VA-001	-3,00	20,00	1,30	Atmosférico	51,169	29,00	ED2	IP3	6,11	IPo	-	
VA-002	-3,00	23,00	1,30	Atmosférico	52,414	28,00	ED2	IP3	6,03	IPo	-	

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.5.1

TABELA C.1.22 – Análise de vulnerabilidade / BLEVE_Sobrepessão / E 3,5m/s - D 5,0m

Vaso Agressor (VAG)	Evento Crítico Primário(ECP)			Substância	Evento Crítico Secundário (ECS)	Evento Crítico Terciário (ECT)	Fenômeno Perigoso (FP)	Vetor de propagação	Massa de substância no vaso (kg)
VP-003	Ruptura Catastrófica			Propano	Ruptura Catastrófica	Ruptura Catastrófica	BLEVE/SP	Sobrepressão	1.329,00									
Coordenadas do centro da explosão				Tipo de Vaso	Distância Vaso Alvo centro da explosão (m)	Sobrepressão Incidente (kPa) (*)	Estado de Dano (ED)	Intensidade de Perda (IP)	Probit (Y) (**)	Possíveis cenários secundários								
α (°)	X	Y	Z															
0	0,00	23,00	1,02															
Vaso Alvo (VAL)	Coordenadas do vaso									(1)	(2)	(3)						
	X	Y	Z															
VP-001	0,00	0,00	1,57							Pressurizado	23,007	14,00	-	-	-	-	-	-
VP-002	0,00	20,00	1,02							Pressurizado	3,000	574,00	ED2	IP3	14,98	BLEVE	ENV	INV
VP-004	0,00	26,00	1,08							Pressurizado	3,001	573,00	ED2	IP3	14,97	BLEVE	ENV	INV
VP-005	-20,00	26,00	3,18							Pressurizado	20,339	16,00	-	-	-	-	-	-
VP-006	-23,00	26,00	3,18							Pressurizado	23,295	13,00	-	-	-	-	-	-
VP-007	-20,00	0,00	1,10							Pressurizado	30,480	8,00	-	-	-	-	-	-
VA-001	-20,00	20,00	1,30							Atmosférico	20,226	17,00	ED2	IP2	4,81	IPo	-	-
VA-002	-23,00	20,00	1,30							Atmosférico	23,197	13,00	ED1	IP1	4,15	IPo	-	-

(*) Resultados SAFETI® (**) cf. equações da Tabela 5.5.1

C.2 ANÁLISE DE VULNERABILIDADE POR IMPACTOS DE FRAGMENTOS

Cálculos realizados conforme indicado no procedimento do apêndice B - Fragmentos

1) Vaso agressor VP-002

TABELA C.2.1 – Alcance máximo e probabilidade de impacto dos fragmentos
(Vaso VP-002)

Vaso agressor: VP-002														
Vaso Alvo	$C_D A_D$	M_F	k	R_{fmax}	D	R	R_{fmin}	u	z_1	z_2	z_3	PI	$\Delta\theta$	$P_{imp,k}$
VA-001	0,4000	523,5	0,0008	557,96	20	0,685	19,315	83,60	0,210	0,155	2,230	0,0073	0,0964	7,56E-03
VA-002	0,4000	523,5	0,0008	557,96	23	0,685	22,315	83,60	0,210	0,155	2,230	0,0084	0,0839	7,54E-03

2) Vaso agressor VP-004

TABELA C.2.2 – Alcance máximo e probabilidade de impacto dos fragmentos
(Vaso VP-004)

Vaso agressor: VP-004														
Vaso Alvo	$C_D A_D$	M_F	k	R_{fmax}	D	R	R_{fmin}	u	z_1	z_2	z_3	PI	$\Delta\theta$	$P_{imp,k}$
VP-005	0,5036	924,5	0,0005	640,41	20	0,8795	19,12	88,96	0,225	0,150	2,230	0,0067	0,0879	6,90E-03
VP-006	0,5036	924,5	0,0005	557,96	23	0,8795	22,12	88,96	0,225	0,150	2,230	0,0089	0,0764	5,97E-03

3) Vaso agressor VP-005

TABELA C.2.3 – Alcance máximo e probabilidade de impacto dos fragmentos
(Vaso VP-005)

Vaso agressor: VP-005														
Vaso Alvo	$C_D A_D$	M_F	k	R_{fmax}	D	R	R_{fmin}	u	z_1	z_2	z_3	PI	$\Delta\theta$	$P_{imp,k}$
VP-004	1,1421	5675	0,0002	308,14	20	3,66	16,34	54,08	0,280	0,000	0,000	0,2348	0,0584	2,46E-03
VP-006	1,1421	5675	0,0002	308,14	3	0,88	2,121	54,08	0,280	0,000	0,000	0,2219	0,3845	1,70E-02

4) Vaso agressor VP-006

TABELA C.2.4 – Alcance máximo e probabilidade de impacto dos fragmentos
(Vaso VP-006)

Vaso agressor: VP-006														
Vaso Alvo	$C_D A_D$	M_F	k	R_{fmax}	D	R	R_{fmin}	u	z_1	z_2	z_3	PI	$\Delta\theta$	$P_{imp,k}$
VP-004	1,1421	5675	0,0002	308,14	23	3,66	19,34	54,08	0,280	0,000	0,000	0,2376	0,0508	2,12E-03
VP-005	1,1421	5675	0,0002	308,14	3	0,88	2,121	54,08	0,280	0,000	0,000	0,2219	0,3845	1,70E-02

APÊNDICE D – MODELOS SAFETI®

Dentre os modelos adotados no estudo de caso do capítulo 6 deste trabalho se destacam:

1) **Modelo “Vessel / Pipe Source Model”**

Este modelo estuda a liberação de um material perigoso nas condições de estocagem ou de processo em tanques, vasos e tubulações, assim como as etapas de sua dispersão até atingir concentrações inofensivas em termos de perigos de explosão, incêndio e contaminação tóxica danosos ao homem e a propriedade. O modelo inclui cálculos de descarga como velocidade e estado da liberação e cálculos envolvendo concentrações tóxicas, inflamáveis e explosivas em zonas de efeito relacionadas com a nuvem em dispersão.

2) **Modelo TNT de explosão “TNT Explosion Model”**

Este modelo estuda a explosão de uma nuvem de vapor pelo modelo TNT equivalente, calculando as distâncias para determinadas sobrepressões, permitindo a estimativa dos danos ao homem e a propriedade. Este modelo constitui uma versão autônoma do “Vessel / Pipe Source Model” dando ao analista o controle sobre os dados de entrada. Ele é útil para a investigação detalhada de perigos de explosão.

3) **Modelo Vaporização de poça “Pool Vaporization Model”**

Este modelo estuda a vaporização de uma poça de líquido, calculando o diâmetro da poça e a taxa de evaporação do líquido. Este modelo constitui uma versão autônoma do “Vessel / Pipe Source Model” dando ao analista o controle sobre os dados de entrada. Ele é útil para a investigação detalhada de evaporações de poças de líquidos inflamáveis.

4) **Modelo Incêndio de poça “Pool Fire Model”**

Este modelo estuda a geometria e intensidade da chama causada por um incêndio de poça e os seus resultados em termos de intensidade da radiação térmica, permitindo a estimativa dos danos ao homem e a propriedade. Este modelo constitui uma versão autônoma do “Vessel / Pipe Source Model” dando ao analista o controle sobre os dados de entrada. Ele é útil para a investigação detalhada de perigos de incêndio.

5) Modelo Jato de fogo “*Jet Fire Model*”

Este modelo estuda a geometria e intensidade do jato de fogo e os seus resultados em termos de intensidade da radiação térmica, permitindo a estimativa dos danos ao homem e a propriedade. Este modelo constitui uma versão autônoma do “Vessel / Pipe Source Model” dando ao analista o controle sobre os dados de entrada. Ele é útil para a investigação detalhada de perigos de incêndio.

6) Modelo BLEVE Sobrepressões “*Bleve Blast Model*”

Este modelo estuda a explosão de um vaso no fenômeno BLEVE, calculando as distâncias para determinadas sobrepressões, permitindo a estimativa dos danos ao homem e a propriedade. Ele é útil para a investigação detalhada de perigos de incêndio.