

## 7. ESTIMATIVA DE FREQUÊNCIAS

### 7.1 Frequência de Ocorrência de Acidentes em Dutos

Os levantamentos sobre o desempenho de dutos apresentam, normalmente, o número de falhas, suas causas e consequências, levando em consideração o duto como um todo, ou seja, com todos os seus componentes e sistemas de proteção, tais como: pintura, proteção catódica, sinalização, etc.

Considerando os estudos existentes sobre acidentes em dutos e o conhecimento da sequência de falhas para este tipo de instalação, confirmada por muitas fontes de dados, pode-se afirmar que a frequência de ocorrência existente representa a frequência de ocorrência para o duto em análise.

Para os cálculos das frequências foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica em diferentes referências internacionais recentes, as quais foram estudadas e definidas no Capítulo 4, de acordo com a tabela 7.1, referente a acidentes em dutos de transporte de líquidos de acordo com os diferentes tipos de vazamentos estudados quantitativamente.

**Tabela 7.1 – Frequências das hipóteses acidentais para as diferentes classes de vazamento levantadas na Análise Histórica**

Classe de Vazamento	% do diâmetro do duto	Frequência Total/ Poliduto (oc/km.ano)	Participação da Taxa de Falha por Classe de vazamento (%)	Frequência por Classe de Vazamento (oc/km.ano)
Furo	5 %	3,15E-04	63,2	1,88E-04
Fenda	20 %		14,0	6,23E-05
Ruptura Catastrófica	100 %		22,8	6,00E-05

As frequências apresentadas na Tabela 7.2 a seguir foram obtidas através da multiplicação da movimentação de cada produto com a porcentagem de movimentação do duto (bombeando ou parado) e da frequência de cada tipologia acidental levantada da Análise Histórica, conforme apresentada na Tabela 7.1 acima.

Vale ressaltar que as porcentagens de movimentação de produto utilizadas foram conservativamente previstas devido à flexibilidade operacional do poliduto em estudo. Mas de acordo com a demanda de mercado estes valores podem variar.

A Tabela 672 apresenta as porcentagens de utilização dos dutos por produto e as taxas de falhas calculadas para o Poliduto Oeste Paulista.



**Tabela 7.2 – Taxas de Falhas segundo utilização do Poliduto Oeste Paulista**

Duto	Produto	Com bombeamento	Sem bombeamento	Taxas de Acidentes Básicas para as Diferentes Classes de Vazamento (oc/km.ano)					
				Furo		Fenda		Ruptura	
		99,9%	0,1%	1,88E-04		6,23E-05		6,00E-05	
				Com bombeamento	Sem bombeamento	Com bombeamento	Sem bombeamento	Com bombeamento	Sem bombeamento
Poliduto Oeste Paulista	Etanol	80,0%	80,0%	1,50E-04	1,50E-07	4,98E-05	4,98E-08	4,80E-05	4,80E-08
	Claros / Biodiesel	20,0%	20,0%	3,76E-05	3,76E-08	1,24E-05	1,25E-08	1,20E-05	1,20E-08

\*Pelo fato de o duto não ficar com claros e biodiesel parado em nenhum momento a frequência é nula e não será levada a diante no relatório.



## 7.2. Árvore de Eventos

A Árvore de Eventos é uma técnica que permite a análise das consequências de um evento indesejado que pode ser gerado devido à ocorrência de falhas em equipamentos, problemas num determinado sistema ou devido a erros operacionais durante a realização de uma determinada atividade.

A Árvore de Eventos descreve as seqüências dos fatos que se desenvolvem para que um acidente ocorra, definindo as possíveis consequências geradas pelo mesmo, estabelecendo uma série de relações entre o evento inicial e os eventos subseqüentes os quais, combinados, resultam nas possíveis consequências (efeitos físicos) do acidente. Essas relações são estabelecidas considerando interferências do homem (operador) com o sistema em estudo, com os sistemas de segurança previstos ou existentes; ou ainda, em situações que possam gerar diferentes tipos de danos, de acordo com a forma em que ocorra o evento.



Considerando as condições de projeto e operação das instalações, a periculosidade das substâncias, as circunstâncias ambientais e locais, bem como os dados provenientes das etapas do estudo já desenvolvidas, o evento inicial escolhido trata-se de um vazamento já consumado.

Assim, as Árvores de Eventos tiveram por finalidade analisar as consequências possíveis dos vazamentos de líquidos inflamáveis, não tendo sido consideradas, conservativamente, neste estudo, as interferências dos sistemas de segurança existentes que eventualmente possam atuar quando da ocorrência do vazamento.

Desta forma, as Árvores de Eventos foram elaboradas para a definição das diferentes seqüências acidentais, decorrentes dos vazamentos anteriormente mencionados.

### 7.3 Líquidos Inflamáveis

O vazamento de um líquido inflamável, no solo, faz com que, num primeiro momento, o produto se espalhe pelo solo formando uma poça, cujas dimensões dependerão da taxa de alimentação (vazão da liberação), das características da substância, do tipo de solo e da presença de obstáculos, como por exemplo, diques de contenção.

O fenômeno seguinte é a evaporação do produto, cuja taxa depende do tamanho da poça, da troca térmica com o ar e com o solo, da velocidade do vento, do tipo de solo e das características da substância (volatilidade).

No caso de não ocorrer ignição imediata, pode-se estudar o comportamento da nuvem de vapor na atmosfera através de modelos de dispersão, que possibilitam estimar a máxima distância atingida pela nuvem inflamável.



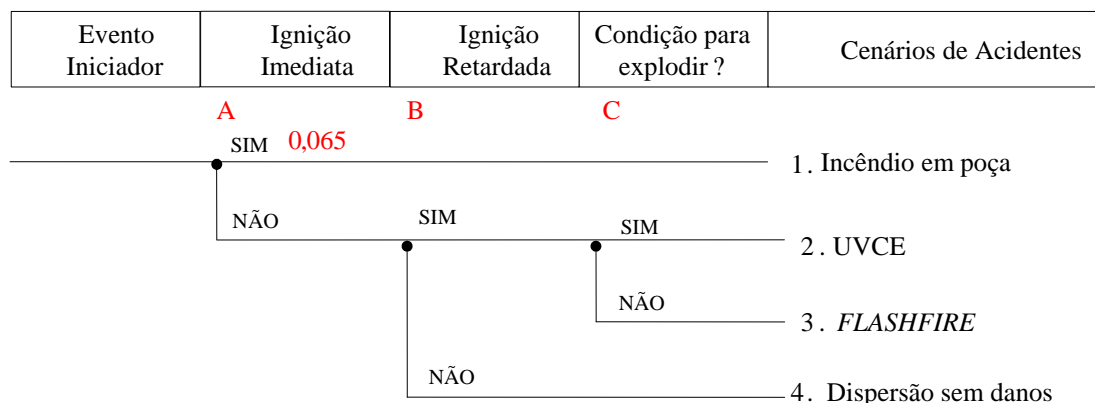
Uma vez formada a nuvem em condições inflamáveis, esta, ao encontrar uma fonte de ignição, poderá gerar dois fenômenos: *flashfire* e *UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion)*.

O *flashfire* é a ignição retardada de uma nuvem de vapor sem efeitos de sobrepressão, porém com efeitos térmicos, e a *UVCE* é a ignição retardada de uma nuvem de vapor onde ocorrem efeitos significativos de sobrepressão, gerando danos às pessoas, equipamentos e edificações.

No *flashfire* ocorre a ignição da massa de vapor sem uma considerável emissão de radiação térmica ao longo da distância. Portanto, a menos que haja um indivíduo dentro da área ocupada pela mistura inflamável, este evento não traz maiores consequências à população circunvizinha.

A ocorrência de uma explosão de nuvem na atmosfera está diretamente relacionada com a massa de produto existente entre os limites de inflamabilidade na nuvem de vapor e ao seu grau de confinamento.

As Figuras 7.1 e 7.2 apresentam respectivamente as Árvore de Eventos para Líquidos Inflamáveis.



**Figura 7.1 – Árvore de Eventos para Vazamentos de Líquidos Inflamáveis - Ruptura Catastrófica (100% diâmetro)**

As probabilidades da árvore de eventos, apresentada na Figura 7.1, são definidas a seguir:



**A** - Probabilidade de ignição imediata – O TNO - Purple Book, nas págs. 4.13 e 4.14, apresenta para instalações fixas, valores de ignição imediata que dependem da taxa de vazamento e da reatividade do produto, conforme mostrado na Tabela 7.3 a seguir:

**Tabela 7.3 - Probabilidade de Ignição Imediata**

Tipo do Vazamento		Substância		
Contínuo	Instantâneo	Líquido	Gás de baixa reatividade	Gás de alta e média reatividade
< 10 kg/s	< 1.000 kg	0,065	0,02	0,2
10 – 100 kg/s	1.000 – 10.000 kg	0,065	0,04	0,5
> 100 kg/s	> 10.000 kg	0,065	0,09	0,7

Fonte: TNO- Purple Book

De acordo com a tabela 7.3, extraída do TNO, a probabilidade de ignição imediata para líquidos é igual a 0,065, independente da taxa considerada. Dessa forma, este valor será utilizado tanto para o Etanol quanto para a Gasolina A.

**B** - Probabilidade de ignição retardada – probabilidade calculada considerando todas as fontes de ignição que se encontram dentro da nuvem de vapor, delimitada pelo Limite Inferior de


Inflamabilidade (LII), num determinado ponto de liberação. A probabilidade é estimada a partir do estabelecido por Lees – Volume 3 – Pág. A7/32 e está apresentado na Tabela 7.4.

**Tabela 7.4 – Probabilidades de Ignição Retardada**

<b>Fontes de Ignição</b>	<b>Probabilidade de Ignição Retardada</b>
Nenhuma*	0,1
Muito poucas	0,2
Poucas	0,5
Muitas	0,9

Fonte: Lees.

\* Em relação à denominação nenhuma para 0,1 de probabilidade, extraída do LEES, ressalta-se que a mesma corresponde ao menor valor estabelecido, não significando, portanto, ausência de fontes de ignição.



Ressalta-se que a probabilidade de ignição retardada é calculada pelo Programa QUANTOX considerando todas as fontes de ignição que se encontram dentro da nuvem de vapor, delimitada pelo Limite Inferior de Inflamabilidade (LII), num determinado ponto de liberação. No caso de dutos, em função da diversidade de características ao longo do duto, é considerada uma malha uniforme de pontos representando fontes de ignição, sendo que em cada ponto é inserido um valor de probabilidade de ignição retardada. Assim, o valor de 0,1 apresentado para Probabilidade de Ignição Retardada nas Figuras 5.3, representa apenas um ponto de fonte de ignição. Quando há mais pontos dentro da nuvem inflamável o programa realiza o seguinte cálculo:

$$\text{Prob. Ignição Retardada} = \text{Prob.A} + \text{Prob.B} - (\text{Prob.A} \times \text{Prob.B})$$

Assim, o valor de probabilidade de ignição retardada varia em função da malha de pontos de fontes de ignição em cada hipótese.

**C -** Condição para explodir – a Tabela 6.5 apresenta as probabilidades de explosão utilizadas na rotina de cálculo do programa QUANTOX, extraída Lees – Volume 2, pág. 16/154 e 16/155. Observa-se que a probabilidade varia com a massa, obtida a partir das simulações das consequências.

**Tabela 7.5 – Probabilidade de Explosão**

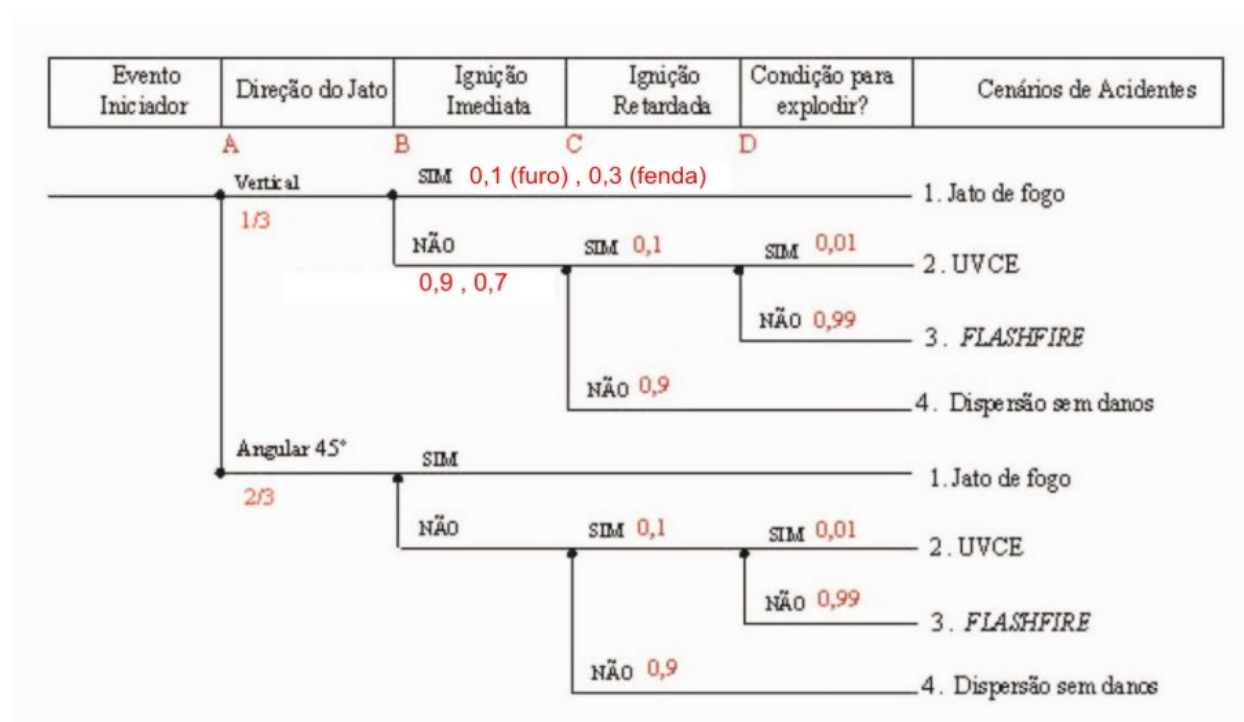
Massa de vapor inflamável (kg)	Probabilidade de Explosão
< 1.000	0,01
> 100.000	1,0

Fonte: Lees.

Para massas menores que 100.000 kg e maiores que 1.000 kg, o programa faz uma interpolação logarítmica para obter a probabilidade de explosão correspondente a massa

## 7.4 Frequências x Direções do Jato

A Figura 6.2 apresenta a árvore de eventos para rupturas parciais, ou seja, fenda (4% da seção transversal do duto) e furo (0,25% da seção transversal do duto).



**Figura 7.2 – Árvore de Eventos para Ruptura Parcial – Fenda e Furo**

As probabilidades da árvore de eventos apresentada na Figura 7.2 são definidas a seguir:

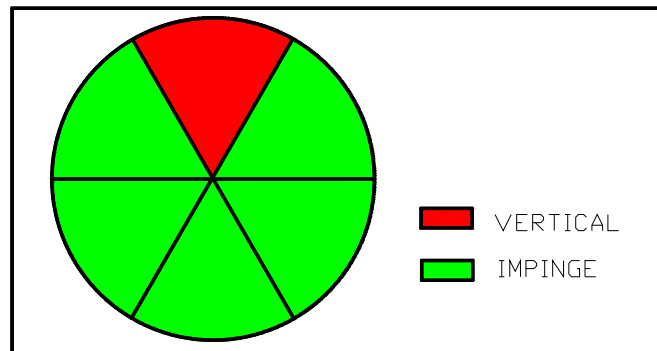
**A** - Probabilidade da direção do jato – considerou-se duas direções para ocorrência do mesmo, ou seja, *impinge* (presença de barreiras, onde o presente estudo trata de duto enterrado) e vertical. Para essas direções foram considerados os seguintes percentuais:

- Direção vertical: 1/6;



- Direção *impinged*: 5/6.

A Figura 7.3 apresenta o Percentual de Ocorrência para a Tipologia Jato de Fogo nas direções *impinge* (presença de anteparos) e vertical.



**Figura 7.3 – Percentual de Ocorrência para a Tipologia Jato de Fogo**



- B** - Probabilidade de ignição imediata - extraída do Relatório do HSE – *Contract Research Report* 206/1999, igual a 0,1 para dutos com diâmetro menor ou igual a 16 polegadas, resultando em jato de fogo;
- C** - Probabilidade de direção do vento - frequência de ocorrência do vento nas respectivas direções. O programa QUANTOX utilizado pelo ITSEMAP do Brasil considera 16 direções do vento, conforme apresentado no capítulo 2;
- D** - Probabilidade de velocidade do vento – probabilidade do evento ocorrer nos períodos diurno e noturno. Considerou-se para o período diurno 50% e para o noturno 50%.
- E** - Probabilidade de ignição retardada – probabilidade calculada considerando todas as fontes de ignição que se encontram dentro da nuvem de vapor, delimitada pelo Limite Inferior de Inflamabilidade (LII), num determinado ponto de liberação. Por exemplo, para duas fontes de ignição, o cálculo realizado pelo programa QUANTOX é:

$$\text{Prob} = [(\text{ProbA} \cdot \text{freqA}) + (\text{ProbB} \cdot \text{freqB})] - [(\text{ProbA} \cdot \text{freqA}) \cdot (\text{ProbB} \cdot \text{freqB})]$$

Onde:

- ProbA = probabilidade associada a intensidade da fonte A (eficiência da fonte de ignição);

- FreqA = percentual de tempo em que a fonte de ignição A está ativa no determinado ponto;

**F** - Probabilidade de não ignição retardada - probabilidade de não ocorrendo a ignição retardada ocorrer a dispersão da nuvem, ou seja: Prob não ignição (**F**) = 1 - Prob ignição (**E**).

A Tabela 7.6 apresenta as frequências x direção do jato utilizadas na sequência do estudo, considerando as frequências de oleoduto.



**Tabela 7.6 – Frequências x Direções do Jato de Produto**

Produto	Bombeamento	Classe de vazamento	Frequência utilizada (oc/km.ano)	Direção do Jato	Probabilidade	Frequência x Direção do Jato (oc/km.ano)
Etanol	Sim	Ruptura	4,80E-5	---	1	4,80E-05
		Fenda	4,98E-05	Vertical	1/6	8,30E-06
				Impinge	5/6	4,15E-05
		Furo	1,50E-04	Vertical	1/6	2,50E-05
				Impinge	5/6	1,25E-04
	Não	Ruptura	4,80E-08	---	1	4,80E-08
		Fenda	4,98E-08	Vertical	5/6	8,30E-09
				Impinge	1/6	4,15E-08
		Furo	1,50E-07	Vertical	1/6	2,50E-08
				Impinge	5/6	1,25E-07
Claros/Biodiesel	Sim	Ruptura	1,20E-05	---	1	1,20E-05
		Fenda	1,24E-05	Vertical	1/6	2,07E-06
				Impinge	5/6	1,03E-05
		Furo	3,76E-05	Vertical	1/6	6,27E-06
				Impinge	5/6	3,13E-05
	Não	Ruptura	1,20E-08	---	1	1,20E-08
		Fenda	1,24E-08	Vertical	1/6	2,07E-09
				Impinge	5/6	1,03E-08
		Furo	3,76E-08	Vertical	1/6	6,27E-09
				Impinge	5/6	3,13E-08

