

## ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCO DE UMA UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE ENXOFRE DE UMA REFINARIA DE PETRÓLEO

### First Author

Heitor de Oliveira Duarte  
UFPE, Av. Acadêmico Helio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, Cep: 50740-530  
heitorod@gmail.com

### Second Author

Enrique Andrés Droguett  
UFPE, Av. Acadêmico Helio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, Cep: 50740-530  
ealopez@uol.com.br

## RESUMO

A indústria do petróleo lida com substâncias altamente perigosas, de modo que vazamentos dessas substâncias comprometem a segurança das pessoas e a qualidade do meio-ambiente, como foi o caso da explosão no Golfo do México em abril deste ano. A Análise Quantitativa de Riscos (AQR) permite quantificar, antecipadamente, o risco desses episódios, servindo como base para o gerenciamento e prevenção de acidentes. Além disso, já existe uma regulamentação brasileira que exige a elaboração de estudos de análise de riscos para o processo de licenciamento de uma instalação ou atividade. Neste sentido, o presente trabalho apresenta a metodologia de AQR e utiliza como estudo de caso uma Unidade de Recuperação de Enxofre de uma refinaria de petróleo, a qual opera com elevadas concentrações de uma substância altamente tóxica: o H<sub>2</sub>S. Os riscos são calculados e avaliados por meio da comparação com os limites de risco estabelecidos pela regulamentação brasileira.

**PALAVRAS CHAVE:** Risco, Análise Quantitativa de Risco, Refino de Petróleo.

## ABSTRACT

The oil industry deals with highly dangerous substances, so that leaks of such substances compromises the safety of people and the quality of the environment, as was the case of explosion in the Gulf of Mexico in April of this year. The Quantitative Risk Assessment (QRA) enables to quantify, in advance, the risk of these episodes, becoming a basis for the management and prevention of accidents. Furthermore, there is already a Brazilian regulation that requires the preparation of studies of risk assessment for the licensing of a facility or activity. In this sense, this paper presents the methodology of QRA and uses as case study a Sulfur Recovery Unit of a petroleum refinery, which operates with high concentrations of a highly toxic substance, the H<sub>2</sub>S. The risks are calculated and evaluated by comparison with the risk limits established by the Brazilian regulations.

**KEYWORDS:** Risk, Quantitative Risk Assessment, Oil refining.

## 1. Introdução

Muitos são os acidentes industriais ocorridos nos últimos anos devido ao vazamento de substâncias perigosas. Mais recentemente, a explosão ocorrida na plataforma de petróleo da empresa British Petroleum no Golfo do México matou onze pessoas e causou um dos maiores desastres ambientais da história. Isso faz com que as autoridades governamentais, a indústria e a sociedade venham exigir mecanismos para a prevenção desses acidentes.

Contudo, observa-se atualmente algumas dificuldades no que diz respeito à quantidade necessária de recursos a serem investidos na prevenção desses acidentes. Surge assim a AQR, a qual permite a quantificação dos riscos existentes em uma instalação e, assim, auxilia na decisão de escolha entre as diferentes alternativas para a redução desses riscos. Essas alternativas podem ser avaliadas quantitativamente e comparadas entre si de acordo com os seus custos de implementação, através de uma análise custo-benefício.

Por sua vez, o crescimento da demanda por combustíveis influenciou no aumento da quantidade e da capacidade de refinarias de petróleo, que apresentam graves riscos em suas atividades. De acordo com Glickman et al. (1992) apud Souza e Freitas (2002), as refinarias tiveram os maiores índices de acidentes graves em indústrias de processo químico no mundo, entre 1945 e 1989, com cinco ou mais óbitos. Os acidentes de refinaria correspondem a 27% do total de eventos e 15% do total de vítimas.

Em especial, uma das unidades fundamentais numa refinaria, a Unidade de Recuperação de Enxofre (URE), concentra grandes quantidades de uma substância altamente tóxica: o gás ácido (constituído em sua maioria por H<sub>2</sub>S). Vazamentos desta substância podem resultar em mortes ou ocasionar lesões irreparáveis em comunidades circunvizinhas à refinaria e comprometer a qualidade do meio-ambiente em volta. Além disso, a URE paralisa suas operações devido a vazamentos e a carga de gás ácido é incinerada, causando poluição ambiental e a paralisação da produção de enxofre elementar. Por isso, são necessárias instalações adequadas na URE, a fim de garantir a confiabilidade operacional e a integridade socioambiental.

A Análise Quantitativa de Riscos (AQR) surge, portanto, como um elemento fundamental para quantificar os riscos existentes na URE e, assim, ajudar na decisão de escolha entre as diferentes alternativas para a redução desses riscos, tornando a unidade mais segura.

O trabalho está dividido em 5 seções. O presente capítulo introduz o tema do trabalho e o descreve em linhas gerais. Na segunda seção é descrito o processo de uma típica URE. Em seguida, a seção 3 apresenta uma revisão bibliográfica de AQR e seus conceitos, e a metodologia a ser utilizada no trabalho é definida. Depois, é feito um estudo de caso na seção 4, o qual consiste na aplicação da metodologia de AQR em uma típica URE de uma refinaria hipotética. Seus resultados são mostrados através da quantificação dos efeitos físicos e dos riscos. Por fim, a seção 5 refere-se à avaliação dos resultados e considerações finais.

## 2. Unidade de Recuperação de Enxofre (URE)

As UREs são projetadas para recuperar o enxofre contido nos fluxos de gás ácido provenientes de outros processos de uma refinaria.

Considera-se neste trabalho, uma URE hipotética que foi projetada para produzir 72 toneladas de enxofre por dia, com uma flexibilidade operacional de 45% a 120%. A eficiência de recuperação de enxofre desta unidade é estimada em 97%.

O tratamento de enxofre pela URE traz os seguintes benefícios: redução da emissão de

dióxido de enxofre na atmosfera, o qual seria gerado pela combustão do gás ácido, no caso do mesmo ser incinerado; e produção de enxofre elementar.

Para a realização deste trabalho, o autor se baseou no real fluxograma de processo de uma URE de uma refinaria da Petrobras. Este documento é de propriedade da Petrobras, foi disponibilizado ao autor para pesquisas e possui termo de confidencialidade. Portanto, o autor não está autorizado a divulgar o documento publicamente. Neste sentido, será usado um fluxograma simplificado do processo da URE, apresentado na Figura 1.

Na AQR, será importante identificar a composição dos fluxos da substância química em cada corrente do processo, bem como sua temperatura, pressão, entre outras características posteriormente descritas. Por exemplo, no fluxo de gás ácido na entrada URE para o Forno 1: 77,6% de  $H_2S$  (em massa), pressão de 1,57 atm, temperatura de 133°C. Todos esses dados estão disponíveis em documentos da Petrobras que detalham o processo.

Para uma descrição detalhada do processo de uma URE, ver Duarte (2009) e/ou Guimarães (2006).

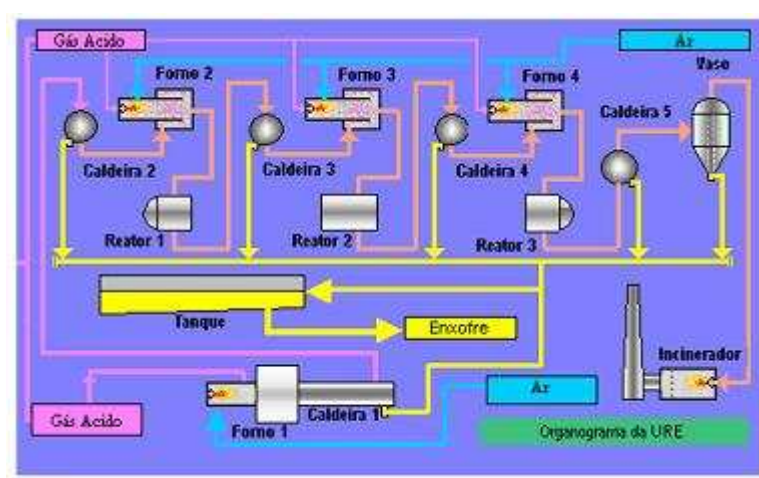


Figura 1 – Fluxograma simplificado da URE.

Fonte: Guimarães (2006)

### 3. Metodologia de AQR

De acordo com a AICHE (2000), risco é uma combinação de evento, probabilidade e conseqüências: uma medida de conseqüências a humanos e meio ambiente e de perdas econômicas em termos da probabilidade do acidente e a magnitude das conseqüências.

Uma AQR tem por objetivo principal servir como base para a tomada de decisões relacionadas com a segurança da instalação, de comunidades circunvizinhas e do meio-ambiente. Dessa forma, a AQR é um dos elementos fundamentais para um programa de gerenciamento de riscos, permitindo que a alocação de recursos para a redução dos riscos seja justificada.

Além disso, a AQR também pode ser executada devido a exigências do órgão regulamentador nos processos de concessão ou renovação de licenciamento ambiental para a instalação. Como de acordo com CETESB (2000, p. 2).

No Brasil, em particular no Estado de São Paulo, com a publicação da Resolução No 1, de 23/01/86, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que instituiu a necessidade de realização do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para o licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente, os estudos de análise de riscos passaram a ser incorporados nesse processo, para determinados tipos de empreendimentos, de forma que, além dos aspectos relacionados com a poluição crônica, também a prevenção de acidentes maiores fosse contemplada no processo de licenciamento.

### 3.1. Etapas da AQR

A AQR procura identificar todos os cenários de acidente que podem vir a ocorrer em uma determinada instalação, quantificando a frequência esperada de ocorrência e as consequências associadas com cada um destes cenários.

O risco pode ser caracterizado por um conjunto de três elementos. O primeiro elemento fornece a descrição completa do cenário de acidente, identificando a causa básica do acidente (evento iniciador) e a evolução do acidente em função do desempenho dos sistemas de proteção existentes na. O segundo elemento corresponde à frequência esperada de ocorrência do cenário de acidente. O terceiro elemento corresponde às consequências indesejadas previstas no caso de ocorrência deste cenário. Conhecendo-se estes três elementos, os riscos da instalação ficam perfeitamente caracterizados.

A Figura 2 ilustra o processo de Análise Quantitativa de Risco. Este processo pode ser dividido em 5 etapas, são elas:

- Caracterização do sistema a analisar;
- Identificação de perigos e acidentes;
- Estimativa das consequências dos acidentes – análise de vulnerabilidade e efeitos físicos;
- Estimativa das frequências de ocorrência dos acidentes;
- Estimativa e avaliação dos riscos.

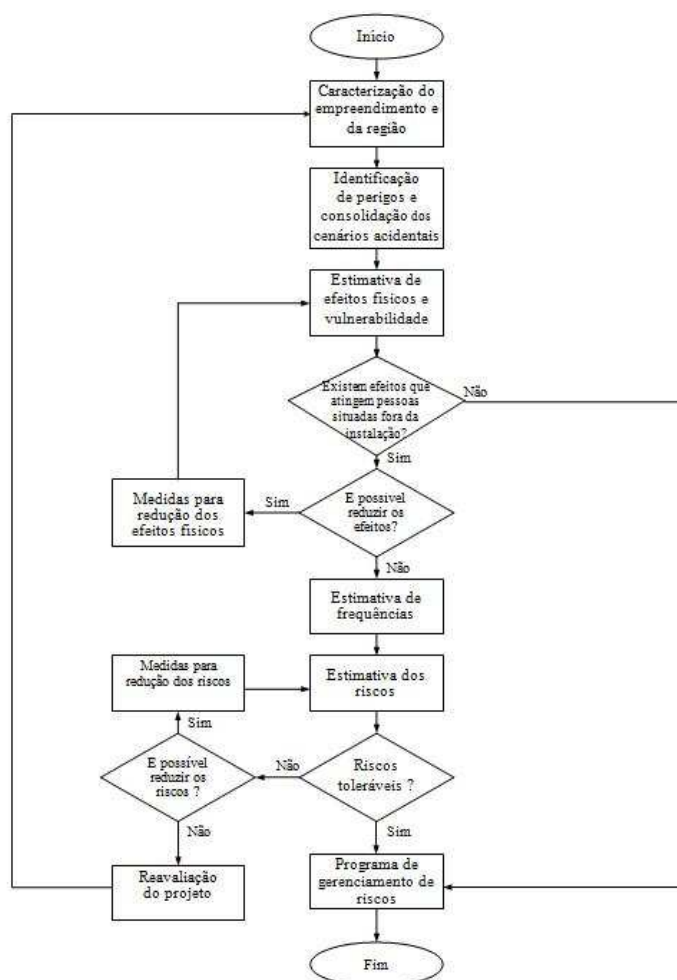


Figura 2 - Etapas para a elaboração de um estudo de análise de riscos.  
Fonte: CETESB (2000)

A primeira etapa consiste numa descrição do sistema a ser analisado em relação a características como: as fronteiras do empreendimento; a localização geográfica, distribuição populacional e características meteorológicas da região; arranjo da instalação; substâncias químicas utilizadas; descrição do processo; apresentação de fluxogramas de processos, de instrumentação e de tubulações; sistemas de proteção e segurança; etc. (CETESB, 2000)

A identificação de perigos é uma etapa qualitativa da análise de risco, e objetiva identificar todos os eventos iniciadores de incidentes, com consolidação dos cenários acidentais e uma hierarquização dos riscos associados. Isso é feito por meio da Análise Preliminar de Riscos (APR), a qual deve conter o risco, a causa associada, os efeitos físicos, a categoria de severidade e observações e recomendações. A Tabela 1 ilustra o modelo de APR utilizado pelo autor.

Análise Preliminar de Riscos (APR)								
Unidade:			Sistema:			Trecho:		
Referência:						Data:		Revisão:
Perigos Identificados	Causas Prováveis	Efeitos Possíveis	Modo de Detecção/Salvaguardas	Cat. Freq.	Cat. Sev.	Cat. Risco	Recomendações / Observações	Cenário

Tabela 1 - Modelo de Análise Preliminar de Riscos utilizado pelo autor.

A hierarquização dos riscos é feita através da categoria de risco, a qual, por sua vez, é determinada pelo cruzamento da categoria de frequência com a categoria de severidade.

Quanto à terceira etapa, efeitos físicos são fenômenos físicos que ocorrem durante ou após o vazamento de substâncias perigosas, como efeitos de sobrepressão decorrentes de explosões, radiações térmicas decorrentes de incêndios e efeitos tóxicos decorrentes de substâncias tóxicas na atmosfera. Já a vulnerabilidade diz respeito aos danos físicos causados às pessoas expostas ao efeito físico. Uma vez que a regulamentação é baseada na probabilidade de morte, a análise de vulnerabilidade indica o percentual de morte na população exposta ou a probabilidade de morte para um indivíduo exposto.

CPR14E (2005) relaciona uma série de efeitos físicos devido ao vazamento de substâncias perigosas e apresenta modelos matemáticos que simulam a ocorrência desses efeitos. Neste trabalho, foram simulados efeitos de nuvem tóxica, incêndio em poça e incêndio em nuvem.

Em resumo, nuvem tóxica consiste numa massa de vapor ou gás causada por dispersão atmosférica de substância tóxica. Incêndio em poça é a combustão de uma poça de líquido inflamável com determinada forma e tamanho. E o incêndio em nuvem é o incêndio repentino e intenso em que a chama se propaga através de uma mistura de ar e gás/vapor inflamável que esteja dentro dos limites de inflamabilidade.

A probabilidade de morte devido à exposição a incêndio em nuvem é 100% se o indivíduo estiver dentro do envelope da chama, i.e. dentro do Limite Inferior de Inflamabilidade (LII). Se o indivíduo estiver fora do limite, a probabilidade é nula.

A probabilidade de morte devido à exposição a nuvem tóxica ou incêndio em poça é calculada usando-se as funções probit. A relação entre a probabilidade de um efeito, P, e o probit correspondente, Pr, a depender do tempo de exposição, t, é dada por: (CPR18E, 2005)

$$P = 0,5 \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\operatorname{Pr} - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \tag{1}$$

$$\text{onde : } \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Existe também uma tabela para dar essa relação de forma mais simples. (CPR18E, 2005, p. 5.2)

A probabilidade de morte em função do nível de exposição quase sempre resulta numa curva sigmóide. Esta pode ser substituída por uma função linear se o probit é usado no lugar da probabilidade de morte.

Para nuvem tóxica, a probabilidade de morte depende da concentração do tóxico,  $C$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), e do tempo de exposição,  $t$ . A função probit para morte devido a tóxicos é dada por:

$$\text{Pr} = a + b \cdot \ln(C^n \cdot t) \quad (2)$$

Onde  $a$ ,  $b$  e  $n$  são constantes que descrevem a toxicidade de uma substância química. CPR18E (2005, p. 5.5) apresenta uma tabela com essas constantes para diversas substâncias. Para o  $\text{H}_2\text{S}$ :  $a = -11,5$ ;  $b = 1$  e  $n = 1,9$ .

Por sua vez, a probabilidade de morte devido a exposição a incêndio em poça vai depender da radiação térmica,  $Q$  ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ), e do tempo de exposição,  $t$ . A função probit para morte devido a radiação térmica é dada por:

$$\text{Pr} = -36,38 + 2,56 \cdot \ln(Q^{4/3} \cdot t) \quad (3)$$

Para a correta estimativa dos efeitos físicos, são necessários pressupostos que servem como informação essencial. Para uma descrição detalhada desses pressupostos, ver CETESB (2000, p. 18-22) e CPR18E (2005, p. 5.1-5.11).

Com relação à quarta etapa, a frequência de ocorrência de um cenário acidental é o número de vezes que o cenário ocorre, e é, normalmente, expressa em uma base anual, tendo dimensão de  $\text{ano}^{-1}$ . Existem valores padrão na literatura para frequências atribuídas a eventos de perda de materiais para diversos casos. (CPR18E, 2005, p. 3.1-3.17).

Apenas os eventos que contribuem para o risco individual ou para o risco social devem ser incluídos na AQR, nas condições de que: (1) a frequência de ocorrência é igual ou superior a  $10^{-8}$  por ano e (2) ocorre letalidade maior que 1% fora dos limites do estabelecimento, de acordo com CPR14E (2005). Essas condições indicam os eventos que devem seguir para a quinta etapa da AQR.

A estimativa e avaliação dos riscos é a etapa final de uma AQR e, portanto, é onde os resultados são calculados e apresentados. Sabe-se que os resultados de uma AQR são expressos através do Risco Social e do Risco Individual, os quais serão brevemente explicados nas subseções 3.2 e 3.3.

O procedimento de cálculo dos Riscos Social e Individual é baseado em CPR18E (2005) e CETESB (2000). Este procedimento é usado em vários programas computacionais e não suporta todas as possibilidades de possíveis eventos. Porém, tem por principal objetivo ilustrar os princípios do cálculo.

### 3.2 Risco Social

De acordo com CETESB (2000, p. 24):

O *risco social* refere-se ao risco para um determinado número ou agrupamento de pessoas expostas aos danos decorrentes de um ou mais cenários acidentais. [...] A forma de apresentação do *risco social* deverá ser feita através da curva F-N, obtida por meio da plotagem dos dados de frequência acumulada do evento final e seus respectivos efeitos representados em termos de número de vítimas fatais.

A Figura 3 mostra a curva F-N adotada por CETESB (2000) como critério para avaliação do risco social. Os riscos situados na região ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), apesar de estarem abaixo da região intolerável, devem ser reduzidos tanto quanto possível.



Figura 3 - Curva F-N de tolerabilidade para risco social.  
Fonte: CETESB (2000)

### 3.3. Risco Individual

De acordo com a CETESB (2000, p. 27), “o risco individual pode ser definido como o risco para uma pessoa presente na vizinhança de um perigo, considerando a natureza do dano que pode ocorrer e o período de tempo em que o mesmo pode acontecer”.

A apresentação dos resultados é feita através de curvas de iso-riscos (contornos de risco individual), os quais permitem visualizar a distribuição geográfica do risco em diferentes regiões. Esta curva é determinada pela interseção de pontos com os mesmos valores de risco provenientes de uma mesma instalação industrial e é também conhecida como “contorno de risco”.

## 4. Aplicação

Nesta seção será aplicada a metodologia de AQR na URE de uma refinaria.

### 4.1. Caracterização do sistema a analisar

O sistema a ser analisado é uma típica Unidade de Recuperação de Enxofre (URE) de uma refinaria hipotética. O processo do sistema foi brevemente apresentado na seção 2. Mais detalhes sobre características do sistema podem ser encontrados em Duarte (2009).

### 4.2. Análise Preliminar de Riscos (APR)

Para a realização da APR, o autor se baseou no fluxograma de processo e no fluxograma de engenharia de uma URE de uma refinaria da Petrobras.

A APR da Unidade de Recuperação de Enxofre apresentou 120 cenários acidentais, utilizando-se a Tabela 1. Todos os 120 cenários acidentais da APR na URE encontram-se no Apêndice de Duarte (2009).

Para a construção dos cenários, foram levantados dados da composição do material corrente nas linhas do processo (com as proporções em massa), temperatura e pressão da corrente, e diâmetro das linhas. Foram considerados como “causas”: fissura ou ruptura nas linhas, válvulas ou conexões; tendo efeitos tanto na segurança pessoal, quanto no meio-ambiente.

Segundo CETESB (2000, p. 18), “deve-se estabelecer claramente o critério considerado para a escolha dos cenários acidentais considerados relevantes, levando-se em conta a severidade do dano decorrente da falha identificada”.

Neste sentido, os cenários acidentais escolhidos foram aqueles com severidade III ou IV, relacionados à liberação de grandes inventários de produtos tóxicos e/ou inflamáveis em pressões e temperaturas elevadas. Desse modo, 10 cenários foram selecionados.

Muitos destes cenários apresentam perigos semelhantes, bem como as outras características (causa, efeitos, severidade, etc.), de forma que cenários acidentais semelhantes podem ser agrupados, e o grupo representado pelo cenário mais severo entre eles. Dessa forma, os 10 cenários selecionados foram agrupados em 5 Eventos Iniciadores (EIs), representando as possíveis consequências mais severas. A Tabela 2 apresenta o agrupamento dos cenários.

Evento Iniciador	Cenários	Perigo	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	Diâmetro da linha (pol.)
EI-01	<b>23</b> , 27	Grande liberação de gás ácido	0,590	133	14
EI-02	<b>43</b> , 59, 75, 91	Grande liberação de enxofre líquido	0,360	175	4
EI-03	47, <b>51</b>	Grande liberação de gás ácido	0,345	270	20
EI-04	109	Grande liberação de gás rico em NH <sub>3</sub>	0,045	90	8
EI-05	55	Grande liberação de gás ácido	0,315	324	20

Tabela 2 - Agrupamento dos cenários acidentais selecionados para análise de vulnerabilidade e efeitos físicos. Em negrito, o cenário mais severo do grupo, o qual representa o evento iniciador.

Os principais contaminantes das correntes são: o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e amônia (NH<sub>3</sub>), pelo potencial de toxicidade; e o enxofre líquido (S) e amônia, pelo potencial de inflamabilidade. Suas proporções (em massa) para cada EI encontram-se na Tabela 3. Vale ressaltar que a amônia é não só tóxica, como também inflamável.

Evento Iniciador	H <sub>2</sub> S (% massa)	SO <sub>2</sub> (% massa)	NH <sub>3</sub> (% massa)	S (liq.) (% massa)
EI-01	77,60	0	0,02	0
EI-02	0	0	0	100
EI-03	6,75	6,72	0	0
EI-04	8,82	0	52,94	0
EI-05	2,77	2,59	0	0

Tabela 3 - Proporção (em massa) dos contaminantes nas correntes dos Eventos Iniciadores.

### 4.3. Análise de vulnerabilidade e efeitos físicos

Os efeitos físicos analisados foram os de nuvem tóxica, incêndio em poça e incêndio em nuvem. Os efeitos de nuvens tóxicas são decorrentes do vazamento de contaminantes tóxicos no estado gasoso, neste caso: H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub> nas correntes dos EIs-01, -03, -04 e -05. O efeito de incêndio em poça é consequência do vazamento de contaminante inflamável no estado líquido, neste caso: enxofre líquido na corrente do EI-02. Por fim, o efeito de incêndio em nuvem é causado pelo vazamento de substância inflamável no estado gasoso, neste caso: NH<sub>3</sub> na corrente do EI-04.

Primeiramente, para quantificar os efeitos certas condições ambientais e premissas foram adotadas, a saber: condições meteorológicas; valores de referência para cálculo do alcance dos efeitos; tempo de vazamento; comprimento das tubulações; quantidade de substância vazada; vazão do contaminante; e topografia. Os valores adotados podem ser encontrados em Duarte



(2009).

Em seguida, foi utilizado o software EFFECTS versão 8.0.1.3218, ferramenta computacional que possibilita calcular efeitos e consequências da liberação acidental de substâncias perigosas. O EFFECTS utiliza os modelos matemáticos em CPR14E (2005) e CPR16E (1992).

As simulações foram feitas para todos os cenários acidentais, obtendo-se os respectivos alcances máximos para os efeitos físicos e vulnerabilidade. (DUARTE, 2009)

Dentre os 5 cenários acidentais, o único que causa efeitos físicos extramuros da refinaria é o do EI-01. A Tabela 4 apresenta os dados de entrada e saída da simulação para o EI-01 e a Figura 4 mostra a planta da refinaria com o comportamento da nuvem tóxica (em azul) na direção mais provável do vento (NE) e velocidade média do vento igual a 3,6 m/s.

Uma vez que os alcances de vulnerabilidade dos outros eventos iniciadores não ultrapassam os limites do empreendimento, quantificar os riscos inerentes a eles seria desperdício de tempo e esforço. Assim, eles podem seguir direto para o programa de gerenciamento de riscos. Por outro lado, o EI-01 apresenta danos extramuros e, como mostra o esquema das etapas para elaboração de uma AQR ilustrado na Figura 2, precisa seguir para as próximas etapas de estimativa de frequências e estima dos riscos. Assim, as próximas seções consistem nas próximas etapas da AQR para o cenário acidental do EI-01.

#### Evento Iniciador 01 – H<sub>2</sub>S

Caracterização do Vazamento			
Substância/Referência		Gás ácido com 77,6% de H <sub>2</sub> S (massa)	
Diâmetro da Tubulação (pol.)		14	
Pressão (atm)		1,5716	
Temperatura (°C)		133	
Tempo de liberação (s)		600	
Massa inicial (kg)		161,57	
Taxa de descarga para cálculo de dispersão (kg/s)		18,218	
Altura do Vazamento (m)		1	
Vazão de H <sub>2</sub> S (kg/s)		14,1	
Resultado das Simulação			
Efeitos		Alcance (m) - DIA	Alcance (m) – NOITE
Nuvem tóxica	IDLH	778,57	2458,60
	1% fatalidade	553,37	1769,30

Tabela 4 - Configuração do cenário acidental do EI-01, com os respectivos alcances máximos de efeitos físicos e vulnerabilidade. IDLH (*Immediately Dangerous to Life or Health*): concentração máxima à qual uma pessoa pode ficar exposta por um período de exposição de 30 minutos sem causar prejuízos irreparáveis a sua saúde.

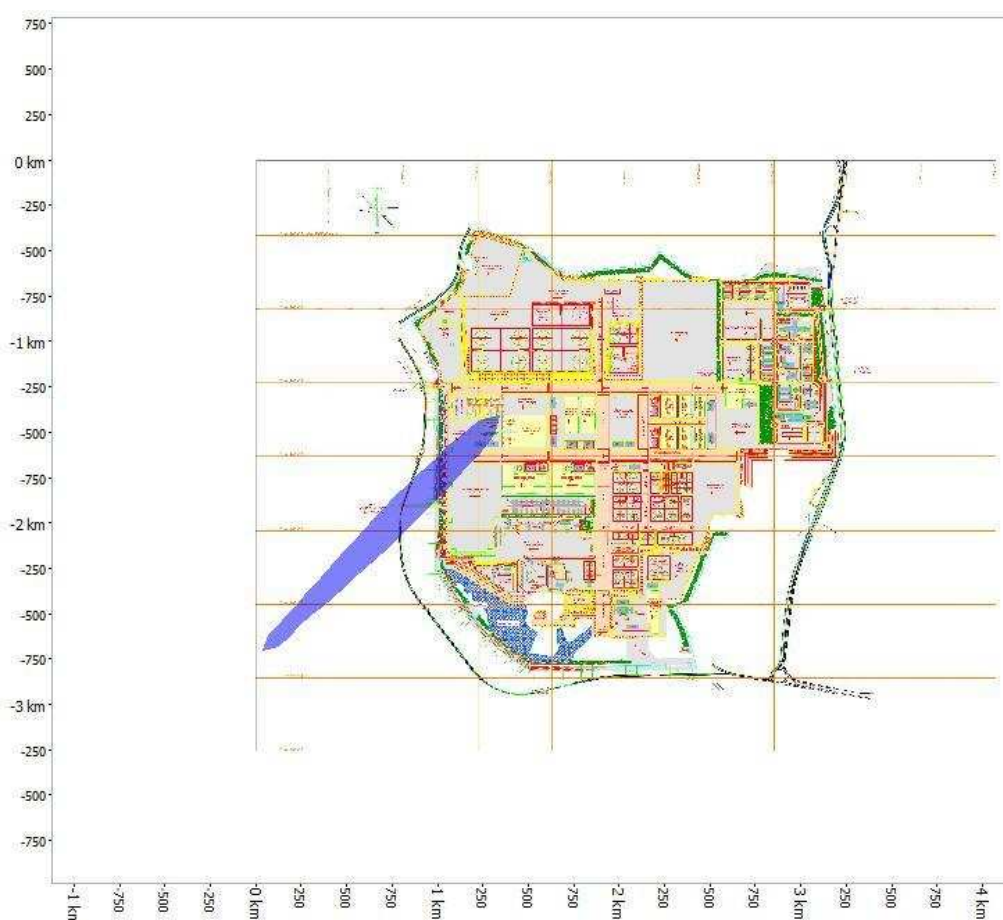


Figura 4 - Alcance da nuvem tóxica no período noturno do EI-01 para 1% de fatalidade na direção mais provável do vento (NE) e com a velocidade média do vento igual a 3,6 m/s.

Com referência à Figura 1, o cenário acidental do EI-01 localiza-se na tubulação entre a carga de entrada de gás ácido na URE e o Forno 1.

#### 4.4. Estimativa da frequência de ocorrência dos acidentes

O EI-01 é caracterizado por ser uma ruptura total em uma tubulação com 14 polegadas de diâmetro (14 pol = 355,6 mm) e 100 metros de comprimento. Conforme a tabela de frequências dos eventos de perda de matéria para tubulações (CPR18E, 2005 apud Duarte, 2009, p. 35), a frequência de ocorrência de tal evento é de  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

Para 100 metros de comprimento:  $f_{EI-01} = 1 \times 10^{-5} / \text{ano}$ .

#### 4.5. Estimativa e análise dos riscos

Para a quantificação dos riscos social e individual utilizou-se o software RISKCURVES versão 7.6, programa computacional para calcular o risco de vazamento de materiais perigosos, através da entrada das consequências, efeitos físicos e frequência do evento. O RISKCURVES utiliza os cálculos descritos em CPR14E (2005), CPR16E (1992) e CRP18E (2005).

A Figura 5 representa o cálculo do risco social. Já para avaliação do risco individual, adotam-se as curvas de iso-risco. Estas são ilustradas na Figura 6.

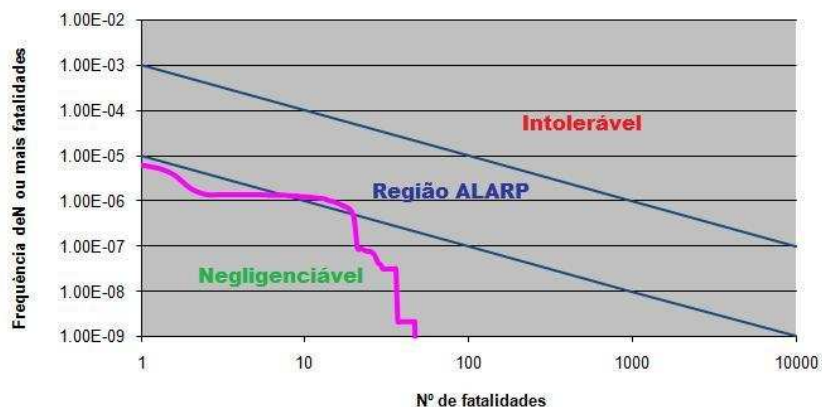


Figura 5 - curva FN (em rosa) do cenário acidental causado pelo EI-01, adotada como critério para avaliação do risco social.

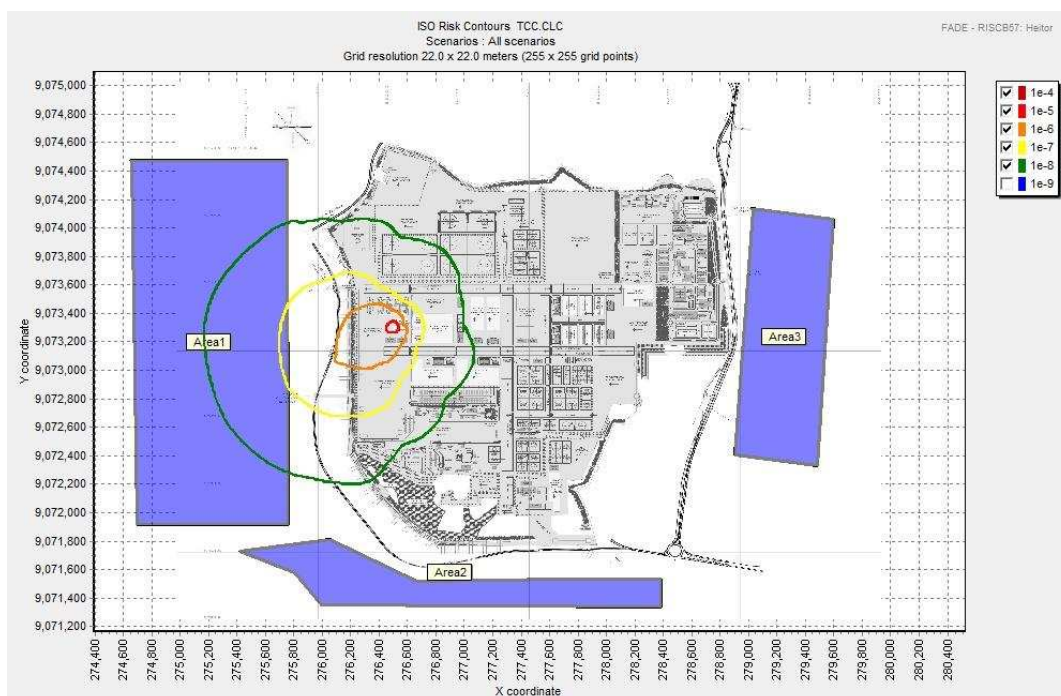


Figura 6 - Curva de iso-risco do cenário acidental causado pelo EI-01, adotada como avaliação do risco individual. Os contornos representam a probabilidade de morte individual e seus valores são aqueles definidos na legenda do canto superior direito.

Os polígonos em azul são áreas populacionais (Área 1, Área 2 e Área 3) as quais foram hipoteticamente definidas. As Áreas 1 e 3 possuem densidade populacional de 90 habitantes/hm<sup>2</sup>, e a Área 2 possui densidade populacional de 70 habitantes/hm<sup>2</sup>.

Segundo CETESB (2000, p. 29), “Para a aprovação do empreendimento, deverão ser atendidos os critérios de risco social e individual conjuntamente [...]”.

O critério para aprovação quanto ao risco social é que a curva FN esteja situada na região Negligenciável ou região ALARP da Figura 5, acima da qual os riscos são intoleráveis.

Quanto ao risco individual, são estabelecidos os seguintes limites:

- Risco máximo tolerável:  $1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$ ;
- Risco negligenciável:  $< 1 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$ .

Desta forma, a região *ALARP* para o risco individual situa-se entre  $1 \times 10^{-5}$  ano<sup>-1</sup> e  $1 \times 10^{-6}$  ano<sup>-1</sup>. Qualquer valor acima de  $1 \times 10^{-5}$  ano<sup>-1</sup> não deve atingir qualquer área populacional.

Analisando a curva FN da Figura 5, o risco social está dentro dos limites, uma vez que situa-se sempre abaixo da região de intolerabilidade. Entretanto, em certos números de fatalidade (entre 10 e 100), a curva encontra-se na região *ALARP*, significando que os riscos devem ser reduzidos tanto quanto praticável.

Quanto ao risco individual, analisando as curvas de iso-risco da Figura 6, o primeiro contorno a atingir qualquer região populacional (contorno amarelo) é o de probabilidade de fatalidade igual a  $1 \times 10^{-7}$  ano<sup>-1</sup>. Este valor está abaixo da região *ALARP* para o risco individual. Embora haja contornos com alto risco individual (maiores que o limite), estes estão dentro das fronteiras do empreendimento e assume-se que as pessoas que lá estão (empregados), o fazem voluntariamente e estão cientes do risco.

Tanto os critérios de risco social, quanto os de risco individual, são atendidos. Portanto, no que diz respeito aos riscos inerentes à URE, o empreendimento deverá ser aprovado.

## 5. Conclusão

O principal foco deste trabalho foi apresentar a metodologia de AQR, baseado nos métodos de cálculo mais atuais (CPR18E, 2005) e na regulamentação brasileira (CETESB, 2000). Como estudo de caso, foi utilizada a URE de uma refinaria para aplicação da AQR.

Os principais perigos e acidentes na URE foram identificados e as suas frequências e consequências de ocorrência foram estimadas. Por fim, os riscos à integridade das pessoas foram estimados, avaliados e comparados com os limites estabelecidos pela regulamentação brasileira. O trabalho é, portanto, um documento de auxílio na tomada de decisão em gerenciamento de riscos de uma refinaria, de forma a tornar a atividade produtiva mais segura. Além de ser útil para possíveis implementações tecnológicas na URE, a fim de aumentar a disponibilidade do sistema.

Mais especificamente, o trabalho procurou explicar a importância da URE na refinaria; apresentou a importância da realização da AQR em instalações e atividades industriais; descreveu as informações necessárias para a realização de uma AQR; apresentou o método para avaliar os riscos qualitativamente, através das Análises Preliminares de Risco; explicitou as exigências estabelecidas pela regulamentação brasileira quanto ao risco social e individual, para a aprovação ou não do empreendimento; e apresentou programas computacionais para a realização de AQRs.

## Referências

- AICHE:** American Institute of Chemical Engineers. *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. 2ª ed. New York. 2000.
- CETESB.** *Manual de orientação para elaboração de estudos de análise de riscos*. 2000. 52 p.
- CPR14E:** Committee for the prevention of disasters. *Methods for the calculation of physical effects (the "Yellow Book")*. 3ª ed. 2005.
- CPR16E:** Committee for the prevention of disasters. *Methods for the Determination of Possible Damage (the "Green Book")*. 1ª ed. 1992.
- CPR18E:** Committee for the prevention of disasters. *Guideline for quantitative risk assessment (the "Purple book")*. 3ª ed. 2005.
- Duarte, H. d. O.** *Análise Quantitativa de Risco de uma Unidade de Recuperação de Enxofre em uma Refinaria de Petróleo*. (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação) - Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- Guimarães, E. M.** *Causas e Formas de corrosão na Unidade de Recuperação de Enxofre da Refinaria Gabriel Passos (REGAP/PETROBRAS)*. (Dissertação de Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2006.
- Souza, C. A. V. d. e Freitas, C. M. d.** *Perfil dos Acidentes de Trabalho em Refinaria de Petróleo*. *Revista de Saúde Pública*. 2002.