

# Análise Quantitativa de Risco de uma Unidade de Recuperação de Enxofre em uma refinaria de petróleo

Heitor de Oliveira Duarte (CEERMA/UFPE – PE, Brasil) - heitorod@gmail.com  
• CEERMA - UFPE – Av. da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, 50740-530, Recife-PE,  
fone: (55) 81-9922-6671 / fax: (55) 81-21268728  
Enrique Andrés López Droguett (CEERMA/UFPE – PE, Brasil) - ealopez@uol.com.br

**RESUMO** Vários segmentos de indústria, especialmente a do petróleo, lidam com grandes quantidades de substâncias altamente perigosas, de modo que vazamentos acidentais podem causar graves danos à sociedade e meio-ambiente, bem como ameaçar o cumprimento das metas futuras da empresa responsável. Observa-se nestas empresas dificuldade de decisão quanto à aceitabilidade do risco e o quanto investir em medidas para a sua redução. Neste sentido, a Análise Quantitativa de Riscos (AQR) permite quantificar, preventivamente, o risco de eventos como explosão, incêndio, dispersão de nuvem tóxica, entre outros. Assim, o gestor terá informação relevante e objetiva para tomada de decisão quanto ao gerenciamento dos riscos. Este trabalho apresenta um método para AQR e faz um estudo de caso, aplicando o método em uma típica Unidade de Recuperação de Enxofre (URE), considerando dados (e.g., de processo, localização, meteorologia, arranjo físico) do projeto da Refinaria Abreu e Lima (RNEST). Estes dados constam no EIA/RIMA da refinaria. A URE foi projetada para operar com elevadas concentrações de uma substância altamente tóxica: o H<sub>2</sub>S. Os riscos foram calculados e os resultados mostram que eles são negligenciáveis, de modo que não há necessidade de reavaliar o projeto desta URE na RNEST.

**Palavras-chave** Risco; Análise de Risco; Análise Quantitativa de Risco; Refino de Petróleo; Unidade de Recuperação de Enxofre.

**ABSTRACT** *Several industrial activities, especially in the oil sector, deal with large amounts of highly hazard substances, so accidental spills may cause serious damage to society and environment, as well as threaten the business goals of the company held responsible. Difficulties have been observed with decisions about the acceptability of risk and how much to invest in measures to reduce it. In this context, the Quantitative Risk Assessment (QRA) allows to preventively quantify the risks of events such as explosion, fire, toxic cloud dispersion and others. Thus, the manager is provided with relevant and objective information for decision making in the risk management process. This paper presents a QRA methodology and a case study, where the methodology is applied in a typical Sulfur Recovery Unit (SRU), considering data (e.g., process, location, meteorological data, layout) of an oil refinery (RNEST) project in Northeastern Brazil. These data are available in the Environmental Impact Statement of the refinery. The SRU was designed to operate with high concentrations of a highly toxic substance: H<sub>2</sub>S. The risks were calculated and the results show that they are negligible, so that there is no need to reevaluate this SRU project in RNEST.*

**Keywords** *Risk; Risk Assessment; Quantitative Risk Assessment; Petroleum Refining; Sulfur Recovery Unit.*

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos são os acidentes industriais ocorridos nos últimos anos, devido ao vazamento de substâncias perigosas (EEA, 2003; AMBRÓSIO e MOTHÉ, 2007). Mais recentemente, a explosão ocorrida na plataforma de petróleo *Deepwater Horizon*, da empresa *British Petroleum* (BP), localizada no Golfo do México, matou onze pessoas e causou o derramamento de 2,1 a 4,3 milhões de barris de petróleo no mar, sendo um dos maiores desastres ambientais da história. Estima-se que 37 bilhões de dólares deverão ser gastos pela BP, em despesas com limpeza, multas, reparos e indenizações. Entretanto, este vazamento poderia ter sido evitado com a aquisição de um equipamento de 500 mil dólares, capaz de vedar o poço, em caso de acidente. As economias foram, portanto, mal calculadas, diante dos riscos assumidos, resultando num prejuízo 74.000 vezes maior para BP, sem contar a degradação da imagem da empresa e a perda de 67 bilhões de dólares no valor de suas ações (BETTI e BARRUCHO, 2010).

Neste sentido, observa-se, atualmente, algumas dificuldades no que diz respeito à quantidade necessária de recursos a serem investidos na prevenção desses acidentes (CETESB, 2000). Surge, assim, a AQR, a qual permite a quantificação dos riscos existentes em uma instalação, de forma a fornecer base objetiva para a aceitação ou não dos riscos, bem como para auxiliar na priorização e na decisão de escolha entre as diferentes alternativas, para a redução dos riscos não aceitáveis (CALABRESE e BALDWIN, 1993; HENLEY e KUMAMOTO, 1996; RIVM, 1999; AICHE, 2000; STAMATELATOS *et al.*, 2002; CPR18E, 2005). Essas alternativas podem ser avaliadas quantitativamente e comparadas entre si, de acordo com os seus custos de implementação, através de uma análise custo-benefício (AKÇAKAYA e SJÖGREN-GULVE, 2000). Entre outras vantagens da realização de uma AQR, para acidentes industriais, estão (CAMACHO, 2004): permite identificar sistematicamente os riscos existentes, levando a um melhor nível de preparação para emergências; é um processo iterativo, de forma que novas informações podem ser incorporadas na análise, a fim de melhorar os resultados; pode ser usada para expressar as mudanças nos impactos causados em função de mudanças em medidas preventivas ou mudanças no projeto da instalação; fornece base numérica para comunicar os riscos às partes interessadas.

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 (SOUZA e FREITAS, 2002)

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  $H_2S$ ) (MEYERS, 2004; JONES e PUJADÓ, 2006). 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 (EPA, 2003). A Análise Quantitativa de Riscos (AQR) é, portanto, um elemento fundamental para quantificar os riscos existentes na URE e, assim, fornecer base numérica e objetiva para as decisões de gerenciamento de risco, a fim de tornar a unidade mais segura.

Três novas refinarias estão em processo de instalação, na região Nordeste do Brasil, sendo uma no Ceará, uma no Maranhão e a outra em Pernambuco. Esta última, conhecida como Refinaria Abreu e Lima (RNEST), prevê um investimento de 4 bilhões de dólares e o processamento de 230 mil barris de petróleo pesado por dia. Ela será erigida em um dos grandes polos de investimentos do Brasil, o Complexo Industrial Portuário de Suape (CIPS). Neste sentido, o presente trabalho apresenta a realização de uma AQR na URE da RNEST, utilizando como principal fonte de dados, o Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) do empreendimento. Este é um documento público disponibilizado pela Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (PETROBRAS/FADE, 2006).

O trabalho está dividido em quatro seções. Na seção 2, é feita 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 3, o qual consiste na aplicação do método de AQR em uma típica URE, considerando condições (localização, meteorologia, arranjo físico, entre outros) da RNEST. Seus resultados são mostrados na seção 4, através da quantificação dos efeitos físicos e dos riscos, e avaliados através da comparação com os limites estabelecidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Por fim, a seção 5 consiste na conclusão do trabalho.

## 2. MÉTODO DE AQR

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

Neste trabalho, estamos lidando com riscos tecnológicos, de forma que tal “evento” citado por AICHE (2000), é entendido como um acidente tecnológico, i.e. eventos raros causados por falha de equipamentos e que podem levar a consequências catastróficas (e.g., explosão, incêndio, vazamentos tóxicos).

O gestor de qualquer empresa deseja minimizar o risco, o que pode ser traduzido em maximizar a probabilidade de sucesso, lucro ou qualquer tipo de ganho. Neste sentido, quanto mais o gestor sabe sobre os potenciais riscos, mais ele estará apto a lidar com eles (CAMPELLO, 2007). A análise de riscos procura identificar os riscos em potencial e os seus impactos (consequências). Assim, a AQR permite quantificar, através de modelos matemáticos, os riscos identificados. Tem por objetivo principal, servir como base para a tomada de decisões relacionadas com a segurança tanto da instalação, como de comunidades circunvizinhas e do meio-ambiente. 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 (HENLEY e KUMAMOTO, 1996; RIVM, 1999; AICHE, 2000; CETESB, 2000; STAMATELATOS *et al.*, 2002; CPR18E, 2005).

Além disso, há uma tendência de que estudos de análise de riscos sejam incorporados nos processos de concessão ou renovação de licenciamento ambiental no Brasil. Sugere-se que estes estudos passem a ser incorporados no EIA/RIMA, para licenciamento de atividades que lidam com grandes quantidades de substâncias perigosas, contemplando não só aspectos relacionados com a poluição crônica, como também, a prevenção de acidentes maiores (CETESB, 2000).

### 2.1. Etapas da AQR

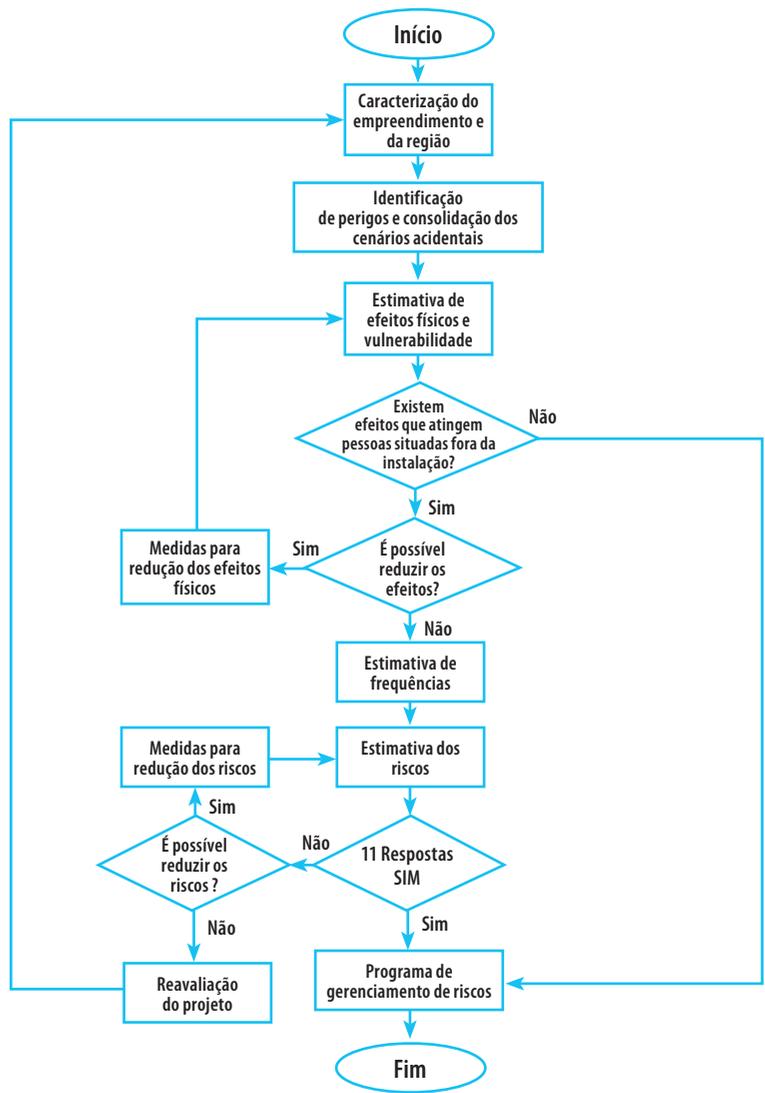
A AQR procura identificar todos os cenários de acidente que podem vir a ocorrer em uma determinada instalação, quantificando a frequência esperada de ocorrência e as consequências associadas com cada um destes cenários. O risco pode ser caracterizado por um conjunto de três elementos. O primeiro elemento 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. 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 1 ilustra o processo de Análise Quantitativa de Risco. Este processo pode ser dividido em 5 etapas; são elas (CETESB, 2000):

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

É importante perceber que AQR é um processo iterativo. Após a etapa (e), deve-se verificar se os riscos são toleráveis ou não. No primeiro caso, os estudos de Análise de Risco servirão como informação relevante para o Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR) da empresa. No segundo caso, quando os riscos são intoleráveis, existem dois possíveis caminhos: (1) quando os riscos são intoleráveis e podem ser reduzidos, deve-se implementar medidas para a redução dos mesmos; (2) este é o pior dos casos: quando os riscos são intoleráveis e não podem ser reduzidos, deve-se reavaliar o projeto. Em ambos os caminhos, a AQR precisará ser refeita e os resultados novamente avaliados. Este processo repete-se até que os riscos sejam toleráveis.

Figura 1 – Etapas para elaboração de estudo de análise de riscos.



Fonte: CETESB (2000).

A primeira etapa consiste numa descrição do sistema a ser analisado, em relação a características como (CETESB, 2000): as fronteiras do empreendimento; a localização geográfica, distribuição populacional e características meteorológicas da região; topografia; 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.

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. Técnicas estruturadas são aplicadas para isso. Esta metodologia faz uso da Análise Preliminar de Riscos (APR), também conhecida por Análise Preliminar de Perigos (APP), apesar de que outras técnicas podem ser usadas, quando o analista achar viável para a instalação sendo analisada. Ericson (2005) fornece mais informações sobre APR e outras técnicas de identificação de riscos.

Ao final desta etapa, deve-se ter um conjunto de cenários acidentais. Uma planilha é geralmente usada para reportar a informação qualitativa que consolida cada cenário, como: perigo, evento iniciador (causa), medidas de controle, possíveis consequências, bem como categorias de frequência e de severidade. Todos os cenários acidentais, classificados com severidade III ou IV, devem ser selecionados, para uma análise mais detalhada nas próximas etapas do método, de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 – Categorias de Severidade.

Categoria	Descrição
I Desprezível	Sem lesões ou, no máximo, casos de primeiros socorros, sem afastamento.
II Marginal	Lesões leves em empregados e terceiros. Ausência de lesões extramuros.
III Crítica	Lesões de gravidade moderada em pessoas intramuros. Lesões leves em pessoas extramuros.
IV Catastrófica	Provoca morte ou lesões graves em 1 ou mais pessoas intra ou extramuros.

Fonte: PETROBRAS (2008)

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. 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 causados pelo 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. 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 à 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 (CPR14E, 2005; CPR18E, 2005):

$$P = 0,5 \cdot [1 + \operatorname{erf}(Pr - 5/\sqrt{2})] \quad (1)$$

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

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:

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

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 à 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 à radiação térmica, é dada por:

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

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 (CPR14E, 2005).

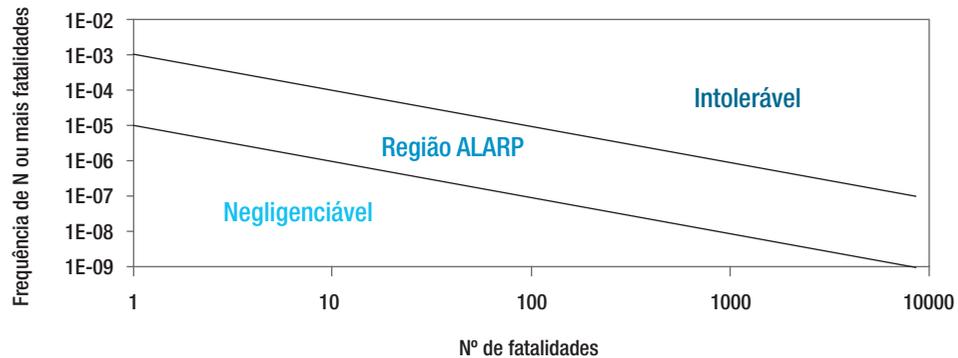
A estimativa e avaliação dos riscos é a etapa final de uma AQR e, portanto, é onde os resultados são calculados e apresentados. Sabe-se que os resultados de uma AQR são expressos através do risco em duas dimensões: o Risco Social e o Risco Individual, os quais serão brevemente explicados nas subseções 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. O trabalho fará uso de um desses programas na aplicação da AQR numa URE.

## 2.2. Risco Social

O risco social refere-se ao risco para um determinado número ou agrupamento de pessoas expostas aos danos inerentes a um ou mais cenários acidentais. A forma de apresentação do risco social é feita através da curva F-N, obtida por meio da plotagem dos dados da frequência acumulada de ocorrência do evento final (i.e., dano ou efeito) e seus respectivos efeitos, representados em termos de número de vítimas fatais (CETESB, 2000).

A Figura 2 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 2 – Curva FN de tolerabilidade para risco social.



Fonte: CETESB (2000)

### 2.3. Risco Individual

O risco individual é 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 (CETESB, 2000). 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”. O analista deve prestar atenção nas curvas de iso-riscos, as quais atingem alguma área populacional e compará-las com os limites de tolerabilidade para o risco individual estabelecidos por CETESB (2000).

## 3. ESTUDO DE CASO

Nesta seção, será aplicada ao método de AQR na URE de uma refinaria de petróleo. Serão consideradas características da RNEST, provenientes do EIA/RIMA da mesma (PETROBRAS/FA-DE, 2006).

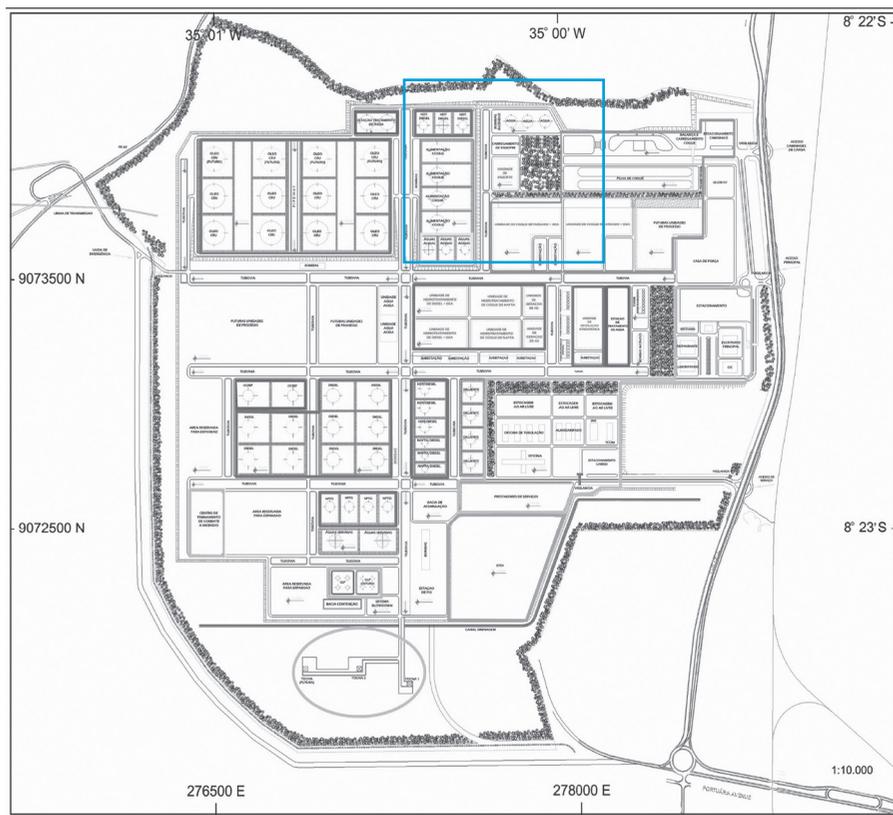
### 3.1. Caracterização do sistema a analisar

As UREs são projetadas para recuperar o enxofre contido nos fluxos de gás ácido, provenientes de outros processos de uma refinaria (MEYERS, 2004; JONES e PUJADÓ, 2006; ARAÚJO, 2007). Considera-se neste trabalho, uma URE 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% (PETROBRAS, 2009). A recuperação de enxofre pela URE traz os seguintes benefícios (GUIMARÃES, 2006; PETROBRAS, 2009): 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.

A análise conduzida neste trabalho se baseia no fluxograma de processo de uma típica URE (Figura 6). 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. Para tanto, considera-se que no fluxo de gás ácido, na entrada URE para o Forno 1, tem-se: 77,6% de H<sub>2</sub>S (em massa), pressão de 1,57 atm, temperatura de 133°C. Para uma descrição detalhada do processo de uma URE, ver Duarte (2009) e/ou Guimarães (2006).

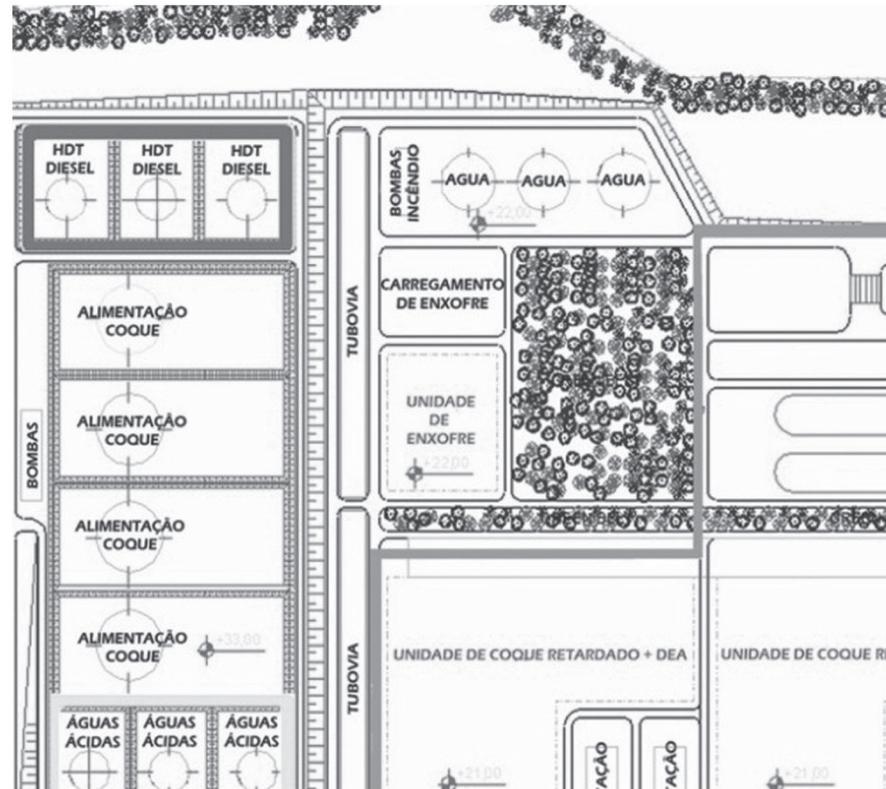
Características como localização, condições meteorológicas e arranjo da instalação foram determinadas considerando a RNEST como empreendimento. Esta será erigida no CIPS, no município de Ipojuca, Pernambuco (PETROBRAS/FADE, 2006). As principais substâncias envolvidas no processo são: sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), água, amônia ( $NH_3$ ), enxofre líquido (S), enxofre gasoso ( $S_2$ ,  $S_6$  e  $S_8$ ) e hidrocarbonetos (HC's). Já quanto às comunidades circunvizinhas à RNEST, áreas populacionais foram hipoteticamente definidas ao redor do empreendimento e serão mostradas mais adiante (Figura 8). A Figura 3 mostra o arranjo físico da refinaria e o muro que a contorna. No retângulo em preto, encontra-se a área destinada à instalação da URE, conforme o *zoom* na Figura 4.

Figura 3 – Arranjo físico do sistema a analisar. A área no retângulo em azul se encontra ampliada na Figura 4, para visualização da área da Unidade de Recuperação de Enxofre.



Fonte: PETROBRAS/FADE (2006).

Figura 4 – Área da Unidade de Recuperação de Enxofre no arranjo físico da refinaria.



Fonte: PETROBRAS/FADE (2006)

### 3.2. 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. Foram identificados e consolidados 120 cenários acidentais na URE. Por limitação de espaço, estes não são apresentados aqui. 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. Os cenários acidentais selecionados para análise quantitativa, foram aqueles com severidade III ou IV (10 dos 120), relacionados à liberação de grandes inventários de produtos tóxicos e/ou inflamáveis em pressões e temperaturas elevadas. Muitos cenários apresentaram perigos semelhantes, bem como outras características (i.e. causa, efeitos e severidade), de forma que cenários acidentais semelhantes puderam ser agrupados, e o grupo representado pelo cenário mais severo entre eles (abordagem conservadora). Assim, os 10 cenários selecionados foram agrupados em 5 Eventos Iniciadores (EIs), representando as possíveis consequências mais severas. A Tabela 1 apresenta o agrupamento dos cenários.

Tabela 1 – 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 (abordagem conservadora).

Evento Iniciador	Cenários	Perigo	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	Diâmetro da linha (pol.)	Proporção do contaminante em massa
EI-01	<b>23, 27</b>	Grande liberação de gás ácido	0,590	133	14	77,6% de H <sub>2</sub> S
EI-02	43, 59, 75, 91	Grande liberação de enxofre líquido	0,360	175	4	100% de S (liq.)
EI-03	47, 51	Grande liberação de gás ácido	0,345	270	20	6,75% de H <sub>2</sub> S; 6,72% de SO <sub>2</sub>
EI-04	109	Grande liberação de gás rico em NH <sub>3</sub>	0,045	90	8	52,94% de NH <sub>3</sub>
EI-05	55	Grande liberação de gás ácido	0,315	324	20	2,77% de H <sub>2</sub> S; 2,59% de SO <sub>2</sub>

Fonte: DUARTE (2009).

### 3.3. 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.

Foi utilizado o *software* EFFECTS versão 8.1.0, programa computacional que possibilita calcular efeitos e consequências da liberação acidental de substâncias perigosas. O EFFECTS baseia-se nos modelos matemáticos de 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. Dentre os 5 cenários acidentais, o único que causa efeitos físicos fora das fronteiras do empreendimento, é o do EI-01, com consequências mais severas quando ocorrido durante a noite. A Tabela 2 apresenta os dados de entrada e saída da simulação para o EI-01 (com as condições meteorológicas do período noturno) e a Figura 5 mostra a planta da refinaria com o comportamento da nuvem tóxica (em azul) na direção mais provável do vento (SE) e velocidade média do vento igual a 4,5 m/s. Mais detalhes sobre os valores adotados na Tabela 2 podem ser encontrados em Duarte (2009).

Tabela 2 – 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.

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)		160,71	
Taxa de descarga para cálculo de dispersão (kg/s)		18,157	
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
Valores de referência para cálculo de nuvem tóxica	IDLH	1087,9	2317,0
	1% fatalidade	740,0	1227,0

Fonte: DUARTE (2009).

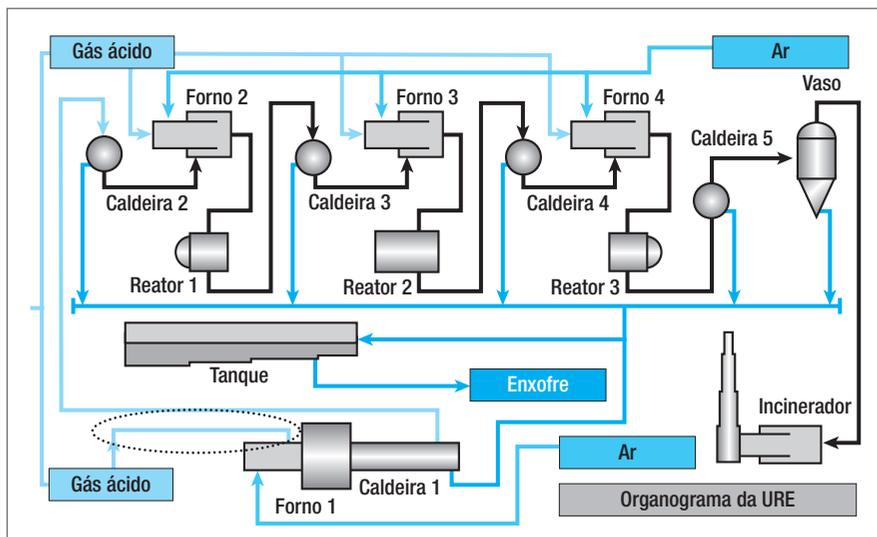
Figura 5 – Alcance da nuvem tóxica, no período noturno do EI-01, para 1% de fatalidade, na direção mais provável do vento (SE), e com a velocidade média do vento igual a 4,5 m/s.



Fonte: DUARTE (2009).

Uma vez que os alcances de vulnerabilidade dos outros eventos iniciadores não ultrapassam os limites do empreendimento, quantificar os riscos inerentes a estes 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 (Figura 1), este precisa seguir para as próximas etapas de estimativa de frequências e estimativa dos riscos. Assim, as próximas seções consistem nas próximas etapas da AQR para o cenário acidental do EI-01. O cenário acidental do EI-01 localiza-se na tubulação entre a carga de entrada de gás ácido na URE e o Forno 1 (Figura 6).

Figura 6 – Fluxograma simplificado de uma típica Unidade de Recuperação de Enxofre. O círculo pontilhado indica a localização do cenário acidental do EI-01.



Fonte: CAMACHO (2004).

### 3.4. 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 = 355,6mm) e 100 metros de comprimento. Conforme a tabela de frequências dos eventos de perda de matéria para tubulações (CPR18E, 2005, p. 3.7), a frequência de ocorrência de tal evento é de  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Considerando 100 metros de comprimento de tubulação:  $f_{EI-01} = 1 \times 10^{-5} / \text{ano}$ .

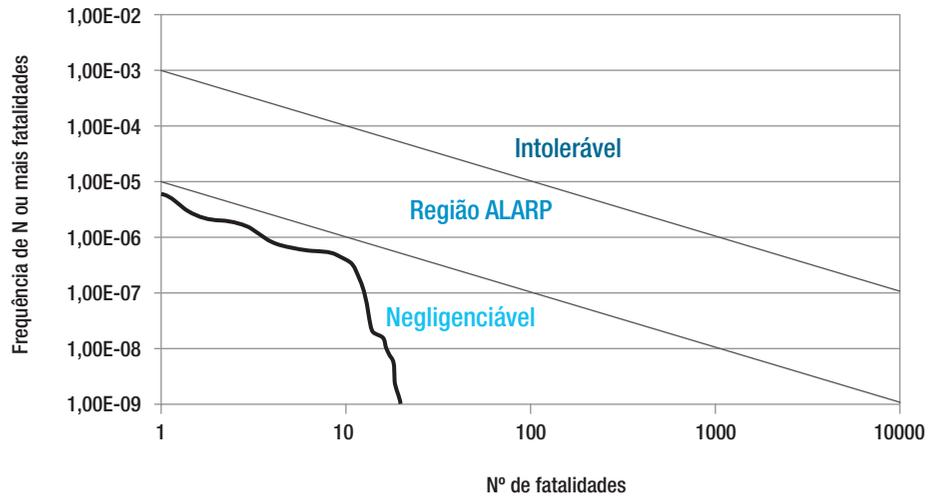
## 4. RESULTADOS

### 4.1. Estimativa 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).

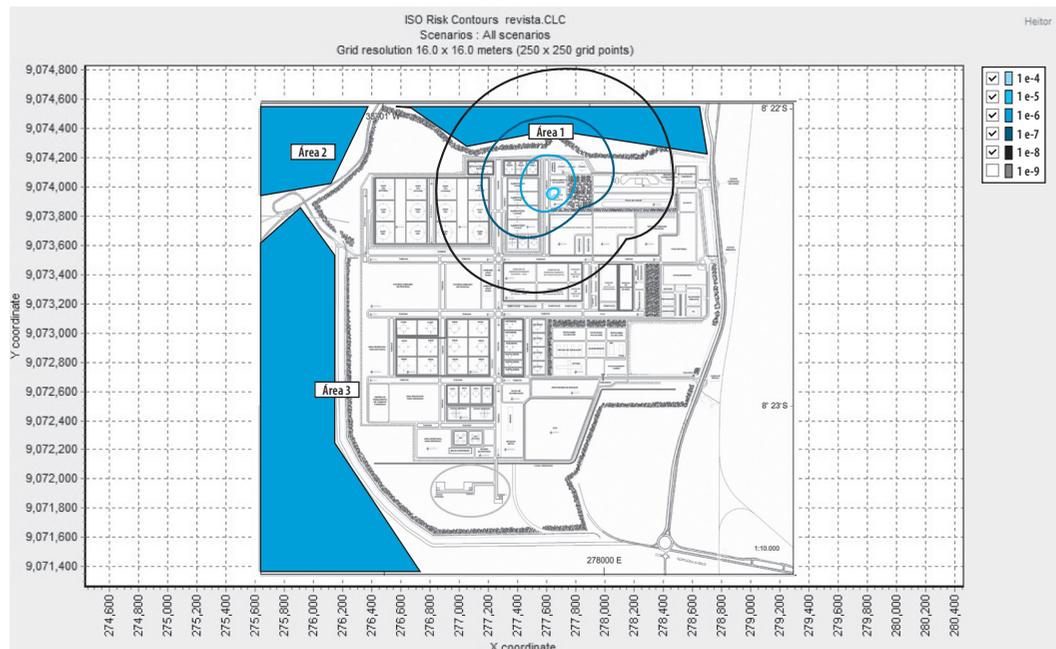
A Figura 7 representa os resultados do risco social. Já para avaliação do risco individual, adotam-se as curvas de iso-risco (Figura 8).

Figura 7 – Curva FN (em rosa) do cenário acidental causado pelo EI-01, adotada como critério para avaliação do risco social.



Fonte: DUARTE (2009).

Figura 8 – 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.



Fonte: DUARTE (2009).

Os polígonos em azul, na Figura 8, são áreas populacionais (Área 1, Área 2 e Área 3), as quais foram hipoteticamente definidas pelo autor. A Área 1 possui densidade populacional de 80 habitantes/hm<sup>2</sup>, a Área 2 possui 90 habitantes/hm<sup>2</sup> e a Área 3 possui 75 habitantes/hm<sup>2</sup>. Vale ressaltar que pelo menos parte da população é protegida por estar dentro de casa. Assim, adotaram-se valores-padrão para a porcentagem de pessoas dentro de casa durante o período diurno e noturno (CPR18E, 2005, p. 5.10), a saber: 93% ao dia e 99% à noite.

## 4.2. Avaliação dos riscos

Para a aprovação do empreendimento, devem ser atendidos os critérios de risco social e individual conjuntamente (CETESB, 2000). O critério para aprovação quanto ao risco social, é que a curva FN esteja situada na região Negligenciável ou região ALARP (Figura 7), acima da qual os riscos são intoleráveis. Quanto ao risco individual, a região ALARP situa-se entre  $1 \times 10^{-5}$  ano<sup>-1</sup> e  $1 \times 10^{-6}$  ano<sup>-1</sup>. Desta forma, qualquer valor acima de  $1 \times 10^{-5}$  ano<sup>-1</sup> não deve atingir qualquer área populacional.

Analisando a curva FN da Figura 7, o risco social está dentro dos limites, uma vez que situa-se sempre abaixo da região de intolerabilidade. Além disso, em nenhum momento a curva encontra-se na região ALARP, significando que não há prioridade em alocar recursos para redução dos riscos da URE. Quanto ao risco individual, analisando as curvas de iso-risco da Figura 8, 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 e situam-se abaixo da região ALARP. Portanto, no que diz respeito aos riscos à saúde humana, não há necessidade em reavaliar o projeto da URE, bem como não há prioridade em alocar recursos para a redução dos riscos da unidade, i.e. o PRG da empresa deve dar prioridade a riscos provenientes de outras unidades, os quais também precisam ser quantificados, a fim de otimizar esse tipo de decisão.

## 5. CONCLUSÃO

O principal foco deste trabalho foi apresentar o método de AQR, baseado nos métodos de cálculo mais atuais (CPR18E, 2005) e no guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2000). Como estudo de caso, foi utilizada uma típica URE de uma refinaria para aplicação da AQR, utilizando características da RNEST. 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. 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 CETESB quanto ao risco social e individual, para a aprovação ou não do projeto; e apresentou programas computacionais para a realização de AQRs.

Vale ressaltar que os riscos ao meio-ambiente (mais conhecido como riscos ecológicos) foram estimados apenas na etapa de análise qualitativa dos riscos (nas APRs), ou seja, tais riscos não foram quantificados. A metodologia para quantificar riscos ecológicos é bem distinta da metodologia de AQR a humanos, aqui apresentada. Neste sentido, os autores estão desenvolvendo pesquisa no âmbito da Análise Quantitativa de Riscos Ecológicos para acidentes industriais (DUARTE e DROGUETT, 2011; 2012a; b), com o objetivo de desenvolver e aplicar métodos capazes de quantificar riscos ecológicos (a plantas e animais) causados por eventos raros (acidentes industriais).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AICHE. **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**. Ed. 2. New York: 2000.
- AKÇAKAYA, H. R.; SJÖGREN-GULVE, P. Population viability analysis in conservation planning: an overview. *Ecological Bulletins*, v. 48, p. 9-21, 2000.
- AMBRÓSIO, M. C. R.; MOTHÉ, C. G. Impactos Ambientais do Derramamento de Petróleo. *Revista TN Petróleo*, s.l., v. 53, p. 98-104, 2007.
- ARAÚJO, M. A. S. **Processos de Refino**. PETROBRAS, 2007.
- BETTI, R.; BARRUCHO, L. G. Como poupar meio milhão e arruinar uma empresa. A economia de 500000 dólares com um dispositivo de segurança levará a BP a gastar 37 bilhões de dólares em multas, reparos e indenizações. *Revista VEJA*, v. 29, n. 2174, 2010.
- CALABRESE, E. J.; BALDWIN, L. A. **Performing Ecological Risk Assessments**. Boca, Raton, FL: Lewis Publisher, 1993.
- CAMACHO, E. N. **Uma Proposta de Metodologia para Análise Quantitativa de Riscos Ambientais**. 2004. (Master's dissertation). Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
- CAMPELLO, F. M. **Decisões Racionais em Situações de Incerteza**. Segunda edição revisada e ampliada. Recife: 2007.
- CETESB. **Manual de orientação para elaboração de estudos de análise de riscos**. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), 2000.
- CPR14E. **Methods for the calculation of physical effects (the “Yellow Book”)**. Ed. 3. 2005.
- CPR16E. **Methods for the Determination of Possible Damage (the “Green Book”)**. Ed. 1. 1992.
- CPR18E. **Guidelines for quantitative risk assessment (the “Purple book”)**. 3. 2005.
- DUARTE, H. D. O. **Análise Quantitativa de Risco de uma Unidade de Recuperação de Enxofre em uma Refinaria de Petróleo**. 2009. (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação). Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- DUARTE, H. O.; DROGUETT, E. L. A methodology for quantitative ecological risk assessment of industrial accidents. **Proceedings of ESREL 2011, European Safety and Reliability Conference**, Troyes, France, 2011.
- DUARTE, H. O.; DROGUETT, E. L. **Improvements in a methodology to quantitative ecological risk assessment for industrial accidents: case study in an oil refinery in Brazil**. Accepted paper. PSAM11 & ESREL 2012 Conference, 2012a.
- DUARTE, H. O.; DROGUETT, E. L. **Integrated stochastic modelling for quantitative ecological risk assessment of potential oil spills in a marine ecosystem at Northeastern Brazil**. XVI CLAIO/XLIV SBPO (This conference), 2012b.
- EEA. Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe. **Copenhagen: Environmental Issue Report**, 2003. ISBN 92-9167-630-6.
- EPA. **Toxicological review of hydrogen sulfide in support of summary information on Integrated Risk Information System (IRIS)**. Washington, D.C.: National Center for Environmental Assessment, 2003.

ERICSON, A. C. **Hazard Analysis Techniques for System Safety**. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2005.

GUIMARÃES, E. M. **Causas e Formas de corrosão na Unidade de Recuperação de Enxofre da Refinaria Gabriel Passos (REGAP/PETROBRAS)**. 2006. (Master's dissertation). Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

HENLEY, E. J.; KUMAMOTO, H. **Reliability Engineering and Risk Assessment**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1996.

JONES, D. S. J.; PUJADÓ, P. R., Eds. **Handbook of Petroleum Processing**. Dordrecht: Springer, 1 ed. 2006.

MEYERS, R. A., Ed. **Handbook of Petroleum Refining Processes**. New York, 3 ed. 2004.

PETROBRAS. N-2782: **Técnicas Aplicáveis à Análise de Riscos Industriais**. 2008.

PETROBRAS. **Process description of the Sulphur Recovery Unit. Second fluid catalytic cracking unit project**, 2009.

PETROBRAS/FADE. **Estudo de Impactos Ambientais da Refinaria do Nordeste**. EIA-RIMA RNEST. Recife, PE: Centro de Documentação da CPRH, 2006.

RIVM. **Guideline for Quantative Risk Assessment**. National Institute of Public Health and the Environment, 1999.

SOUZA, C. A. V. D.; FREITAS, C. M. D. Perfil dos Acidentes de Trabalho em Refinaria de Petróleo. **Revista de Saúde Pública**, v. 36, n. 5, p. 576-583, 2002.

STAMATELATOS *et al.* **Probabilistic risk assessment procedures guide for NASA managers and practitioners**. Washington, DC: Office of Safety and Mission Assurance, NASA Headquarters, 2002.