



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Análise de Sensibilidade na Determinação do Nível de Integridade de Segurança

Gustavo Henndel Lopes
143458

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler

Co-Orientador:
Eng. M.Sc. Marcelo Escobar Aragão

Porto Alegre

2010

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, fica aqui expressa a minha gratidão, especialmente:

- ao Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler, professor orientador, pela oportunidade de trabalho e pelo aconselhamento;
- ao Eng. M.Sc. Marcelo Escobar Aragão, co-orientador deste trabalho, pela inestimável contribuição e disponibilidade;
- a Luiz Miguel de Mello Manssur, Gerente da Oxiteno Triunfo, pela determinação em ajudar e pelos hábeis encaminhamentos;
- a Roberto Dias, Coordenador de Processos da Oxiteno Triunfo, pela disposição e por transmitir pacientemente sua experiência prática na indústria;
- a Luiz Motohissa Yojo, especialista em Automação da Oxiteno, pelas opiniões e materiais de pesquisa transmitidos;
- a Leandra Estrella, engenheira da Oxiteno, pelas informações prestadas e pelos aconselhamentos.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
RESUMO	vi
INTRODUÇÃO	1
FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 SEGURANÇA DE PROCESSO	3
2.2 ACIDENTES DE PROCESSO.....	4
2.2.1 <i>Acidentes de processo de grande escala</i>	4
2.2.2 <i>Danos causados por acidentes de processo</i>	6
2.3 BARREIRAS DE SEGURANÇA	6
2.4 SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURANÇA	8
2.5 NÍVEL DE INTEGRIDADE DE SEGURANÇA – SIL	9
2.5.1 <i>Ciclo de vida de segurança</i>	10
2.5.2 <i>Considerações econômicas a respeito do SIL</i>	11
2.5.3 <i>Normas relacionadas</i>	12
METODOLOGIA	14
3.1 MÉTODO DO GRÁFICO DE RISCO CALIBRADO	14
3.2 METODOLOGIA COMPUTACIONAL	16
3.2.1 <i>Modelo computacional para a determinação do SIL requerido</i>	17
3.2.2 <i>Modelo computacional para a análise de sensibilidade na determinação do SIL</i>	18
ESTUDO DE CASO	19
4.1 A EMPRESA.....	19
4.2 O PROCESSO PRODUTIVO.....	19
4.2.1 <i>Processo produtivo de metil-etil-cetona</i>	19
4.3 SISTEMA DE PROTEÇÃO DA COLUNA D-620.....	22
4.3.1 <i>Apresentação do SIS da D-620</i>	22
4.3.2 <i>Possíveis consequências de falhas no I-07</i>	23
RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5.1 CALIBRAÇÃO DO GRÁFICO DE RISCO	25
5.2 DETERMINAÇÃO DO SIL REQUERIDO	26
5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA DETERMINAÇÃO DO SIL.....	28
5.3.1 <i>Sensibilidade ao risco ambiental</i>	28
5.3.2 <i>Sensibilidade ao risco econômico</i>	29
5.3.3 <i>Sensibilidade à taxa de demanda</i>	30
5.3.4 <i>Sensibilidade à variação conjunta risco ambiental-taxa de demanda e risco econômico-taxa de demanda</i>	31
5.3.5 <i>Sensibilidade à variação conjunta risco ambiental-risco econômico</i>	31
5.3.6 <i>Sensibilidade à variação conjunta do risco ambiental, risco econômico e taxa de demanda</i>	31
CONCLUSÕES	32
BIBLIOGRAFIA	34
APÊNDICE 1	36
APÊNDICE 2	42
ANEXO 1	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: O modelo do queijo suíço de James Reason descrevendo a ocorrência de acidentes.	7
Figura 2: Distribuição em camadas de barreiras de proteção.	8
Figura 3: Esquema do ciclo de vida de segurança de um SIS.	11
Figura 4: Gráfico de Risco Calibrado empregado para a determinação do SIL requerido.	16
Figura 5: Esquema do processo produtivo da Oxiteno Triunfo, com ênfase para a etapa relacionada a este trabalho: purificação de MEC.	20
Figura 6: Tela do painel de controle com as etapas de desidratação e purificação de MEC.	21
Figura 7: Tela do painel de controle com as etapas de condensação e estocagem de MEC.	21
Figura 8: Comportamento esperado para o SIL quando se permite variar o risco ambiental para a FIS I-07.1.	29
Figura 9: Comportamento esperado para o SIL quando se permite variar o risco econômico para a FIS I-07.1.	30
Figura 10: Comportamento esperado para o SIL quando se permite variar a taxa de demanda para a FIS I-07.1.	30
Figura A.1: Previsão da amplitude dos impactos oriundos de acidente de grandes proporções com vazamento na coluna D-620.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis de integridade de segurança e seus atributos.....	10
Tabela 2: Categorias e subcategorias do método do gráfico de risco calibrado.....	15
Tabela 3: Composição do intertravamento de segurança I-07 da coluna de purificação de MEC D-620.	22
Tabela 4: Faixas de valores adotadas na calibração do gráfico de risco.	26
Tabela 5: Definição do SIL requerido para as FIS do I-07.	27
Tabela 6: Comportamento dos parâmetros e do SIL quando se permite variar o risco ambiental associado à FIS I-07.1	29
Tabela 7: Comportamento dos parâmetros e do SIL quando se permite variar o risco econômico associado à FIS I-07.1.....	30
Tabela 8: Comportamento dos parâmetros e do SIL quando se permite variar a taxa de demanda associada à FIS I-07.1.....	31

RESUMO

O gráfico de risco calibrado é um dos métodos mais utilizados para a determinação do nível de integridade de segurança (SIL) requerido para sistemas instrumentados de segurança. Entretanto, tal qual descrito na norma IEC-61511, trata-se de uma metodologia semi-qualitativa na definição de seus parâmetros. Com o objetivo de complementar as tomadas de decisão na determinação do SIL requerido, foram criados dois modelos computacionais genéricos e sistemáticos, implementados no pacote de otimização GAMS[®]. O primeiro deles permite a definição do SIL requerido a partir de entradas simples fornecidas pelo usuário. Na sequência, um segundo modelo possibilita a realização de uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada no valor de SIL obtido. O emprego destes métodos é avaliado através da aplicação ao sistema instrumentado de segurança de uma coluna de destilação de metil-etil-cetona instalada industrialmente. Os resultados comprovam o funcionamento e a eficácia dos modelos para a determinação do SIL, demonstram que o parâmetro mais sensível em sua definição é a taxa de demanda do sistema instrumentado de segurança e quantifica, com relação aos parâmetros de entrada, os intervalos que separam o SIL inicialmente determinado de outro valor de SIL.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A Segurança de Processo é um ramo vital da Engenharia, responsável por prevenir e lidar com grandes quantidades de substâncias perigosas e de energia liberadas no caso de acidentes em unidades industriais. Atualmente a Segurança de Processo é frequentemente entendida do ponto de vista de barreiras de segurança, sejam estas preventivas ou mitigadoras. Em meio às diversas camadas de proteção que um sistema pode apresentar, os sistemas instrumentados de segurança destacam-se como uma das barreiras mais importantes que se conhece, sendo normalmente a última alternativa a ser empregada, após terem se esgotado as possibilidades de se fazer o processo intrinsecamente seguro.

Para garantir, normatizar e certificar a confiabilidade destes sistemas e o nível de segurança que os processos exigem, diversas normas foram criadas a nível mundial nas últimas décadas. Foi assim definido o conceito de nível de integridade de segurança, SIL, e, juntamente com ele, diversos métodos para sua determinação. Estes englobam a análise de riscos pessoais, ambientais e econômicos, a análise da exposição pessoal na área de risco, os meios de se evitar um acidente, a taxa de demanda do sistema de segurança, dentre outros.

Uma análise mais criteriosa destes métodos revela que todos, apesar do rigor e da qualidade, valem-se, em maior ou menor grau, de critérios às vezes qualitativos ou mesmo subjetivos. Por esta razão, aqueles que os empregam devem fazê-lo munidos de informações as mais precisas e quantificáveis possíveis, assegurando assim a validade e a aceitabilidade de suas decisões.

O objetivo deste trabalho é criar modelos computacionais sistemáticos e genéricos que auxiliem as tomadas de decisão daqueles que se defrontam com o problema da definição do SIL requerido para uma dada aplicação. Assim sendo, com base no método do gráfico de risco calibrado apresentado pela norma IEC-61511, este trabalho se propõe a, num primeiro momento, criar um modelo computacional para a determinação do SIL requerido. Em

seguida, um modelo é desenvolvido para a análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada do método no valor de SIL.

A utilização destes modelos é ilustrada por sua aplicação a um sistema real, encontrado na unidade industrial da empresa Oxiteno localizada no Pólo Petroquímico de Triunfo. Faz-se, para tanto, o estudo de caso do sistema instrumentado de segurança de uma coluna de destilação de metil-etil-cetona.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SEGURANÇA DE PROCESSO

A Segurança de Processo trata essencialmente da prevenção de grandes liberações de energia ou de substâncias em quantidades perigosas e da limitação da magnitude e das consequências de tais eventos. Preocupa-se especialmente com as liberações que possam ferir não apenas empregados, mas também o público em geral, causar perdas materiais dentro e fora do local do acontecimento, ocasionar perdas de produção ou provocar danos graves ao meio ambiente (MARSHAL, RUHEMANN, 2001).

Na maioria das indústrias, o interesse principal é garantir a segurança do trabalhador através de medidas como proteção de máquinas, aviso de cargas em movimento e isolamento elétrica. Os acidentes, com exceção dos que envolvem fogo, raramente têm algum impacto nos trabalhadores não-diretamente envolvidos no evento ou em terceiros. As indústrias de processo, entretanto, estão numa situação diferente, pois os acidentes podem resultar na liberação de materiais tóxicos ou de grandes quantidades de energia, com consequências desastrosas para trabalhadores e terceiros. Além disso, as liberações de uma planta química podem ultrapassar o limite da área industrial e ter efeitos a curto e a longo prazo (SKELTON, 1997).

Foram necessários vários séculos de difíceis experiências para que se aperfeiçoasse a disciplina de segurança. De fato, atingir tal nível técnico requer uma vasta gama de conhecimentos tanto em tecnologia quanto em gestão (ROLAND, MORIARTY, 1990). Um bom programa de Segurança de Processo contempla o projeto de processos e equipamentos intrinsecamente mais seguros, o projeto e a implementação de diversos sistemas de segurança, o controle da operação, os serviços de manutenção preditiva, preventiva e corretiva, a identificação e a avaliação de perigos, a elaboração e a utilização de procedimentos

operacionais e de emergência, o treinamento dos envolvidos na operação da fábrica e de todos os que trabalham em suas instalações, a realização de auditorias internas e externas, a investigação de incidentes e de acidentes, o planejamento de ações de emergência, o atendimento à legislação, a interface com a sociedade e com as autoridades públicas, dentre muitos outros (GREENBERG, CRAMER, 1991).

2.2 ACIDENTES DE PROCESSO

É impossível imaginar como seria o mundo se não existissem produtos químicos. Eles são uma parte necessária e indissociável da vida da maior parte da população e seus benefícios são incalculáveis. Ao mesmo tempo, estes materiais podem ser prejudiciais à sociedade. A poluição, os danos à saúde, os incêndios e as explosões parecem andar junto com a produção, o processamento e o uso de produtos químicos.

De acordo com o 1º Encontro Internacional de Engenharia e Análise de Riscos em Indústrias Químicas e Petroquímicas, à medida que a população aumentou e mais países se industrializaram, a procura por esses produtos cresceu. Como resultado, surgiram mais e maiores instalações industriais. À medida que as instalações cresceram, aumentaram as capacidades de armazenamento e vazão. Simultaneamente, as distâncias de separação entre as instalações e a população local diminuíram. Resulta dessas mudanças um aumento na probabilidade de que um acidente de processo dentro das fábricas afete adversamente as vizinhanças. Paralelamente, os custos de reparação dos danos físicos e as indenizações das vítimas e de suas famílias aumentaram drasticamente. Ainda, a legislação e suas implicações tornaram-se extremamente rígidas e onerosas para as empresas que não as adotarem plenamente. Finalmente, a preocupação com a imagem da companhia perante a sociedade e as instituições públicas e privadas passou a ser de suma importância para a continuidade de suas operações. Em vista desta crescente realidade, é cada vez mais importante que as instalações químicas reduzam a probabilidade, o número e a gravidade dos acidentes.

2.2.1 ACIDENTES DE PROCESSO DE GRANDE ESCALA

A maior parte dos acidentes de processo são causados por substâncias explosivas, inflamáveis e tóxicas.

Dependendo do tipo de vazamento ou derramamento, da disponibilidade de fontes de ignição e do tipo de produto envolvido, os perigos de incêndio apresentam-se sob diversas formas. Seus danos são causados tanto pela chama direta quanto pelo calor radiante.

Segundo o 1º Encontro Internacional de Engenharia e Análise de Riscos em Indústrias Químicas e Petroquímicas, incêndios e explosões de nuvens de vapor podem ocorrer quando houver perda de contenção de substâncias inflamáveis; substâncias na fase gasosa formam tais nuvens muito rapidamente, mas líquidos acima do ponto de fulgor também o fazem. Estas substâncias, ao se misturarem com o ar circundante, formam nuvens e propagam-se com o vento. Alguma parte da nuvem estará dentro dos limites de explosividade e, se encontrar uma fonte de ignição, inflamam-se-á. A chama se propagará através da nuvem, retornando diretamente à fonte geradora de vapor se a nuvem for contínua. Neste trajeto, há risco de formação de incêndios secundários. Se a nuvem explodir, os danos serão ainda maiores, não apenas pelos efeitos térmicos, mas também pelas ondas de pressão geradas. Num cenário ainda mais crítico, a nuvem de vapor pode ainda ser tóxica.

Ainda conforme o 1º Encontro Internacional de Engenharia e Análise de Riscos em Indústrias Químicas e Petroquímicas, vazamentos ou derramamentos suficientemente grandes resultarão em acúmulo de líquido no chão. Se produzida a ignição, o incêndio resultante será severo e conhecido como incêndio de poça. Quando líquidos ou substâncias gasosas inflamáveis vazam de recipientes pressurizados, o vazamento pode tomar a forma de sprays e de vapor. Se ocorrer a ignição deste produto, o incêndio será dito de tocha ou de maçarico. Contabilizam-se ainda graves incêndios provocados pela rápida combustão de material sólido oxidável finamente particulado. Nestes casos, a explosão inicial gera forte turbulência, que dispersa o material particulado; a segunda explosão ocorre, então, de forma muito mais intensa (CASAL, 2008).

Por fim, o 1º Encontro Internacional de Engenharia e Análise de Riscos em Indústrias Químicas e Petroquímicas menciona a explosão por ebulição de líquido e expansão de vapor (*boiling liquid expanding vapor explosion – BLEVE*). É um evento muito grave que ocorre mais frequentemente quando um tanque de armazenamento de gás liquefeito é exposto ao fogo. A pressão interna aumenta até um valor que o tanque não mais pode suportar, rompendo-se violentamente. A maior parte do produto evapora instantaneamente e entra em ignição; o resto é atomizado mecanicamente de forma imediata, resultando numa grande bola de fogo que se expande à medida que a densidade do meio diminui. Além dos efeitos térmicos extremos, são de importância igualmente grande os riscos de sobrepressão, de estilhaços e de propulsão de partes do tanque a altas velocidades por grandes distâncias. *BLEVE* pode ocorrer ainda por indução mecânica (fragilização da estrutura) ou por puro excesso de pressão no

recipiente, mesmo sem a existência de fogo ou outra fonte de calor nas proximidades, e sem a formação de bolas de fogo.

Quanto às liberações de produtos tóxicos, os danos advêm, em geral, da inalação de gases e vapores, da ingestão oral, da absorção pela pele e mucosas e do contato com os olhos. Se há formação de nuvem, a sua densidade em relação ao ar ambiente e as condições meteorológicas ditarão a velocidade de dispersão e a intensidade dos riscos. A variedade, a intensidade, a velocidade de aparição e a duração dos diversos efeitos deletérios variam em função das características específicas de cada substância, de suas concentrações, do tempo de exposição, dentre outros. Os riscos mais comuns são morte, depressão do sistema nervoso central, asfixia, efeitos narcóticos, efeitos anestésicos, convulsões, efeitos cancerígenos, paralisias, irritações diversas, desorientações, tonturas, letargia, perda de consciência, coma, queimaduras, náuseas, vômitos etc. Comumente ocorrem lesões crônicas.

2.2.2 DANOS CAUSADOS POR ACIDENTES DE PROCESSO

Segundo Casal (2008), em se tratando de riscos pessoais, as mais severas consequências dizem respeito às substâncias explosivas, seguidas pelas tóxicas e pelas inflamáveis. Os danos pessoais referem-se tanto à perda de vidas, aos ferimentos e aos problemas de saúde decorrentes do acidente, quanto aos custos de intervenção e de evacuação quando do evento.

Os danos ambientais englobam os recursos e áreas afetados pelo acidente, a fauna e flora atingidas e os aspectos sociais afetados, como prédios históricos, paisagens e a vida cultural. Os corpos d'água são diretamente afetados por derramamentos, poluição do solo e água de incêndio contaminada derramada em rios ou oceanos. A poluição atmosférica, presente em quase todos os tipos de acidentes, costuma dispersar-se logo. Os danos materiais englobam as perdas de produção, perdas de produtos estocados, a destruição de depósitos, veículos, equipamentos de processo, utilidades, vias de transporte, construções diversas e áreas industriais. Existem ainda as drásticas reduções nos lucros da empresa pela perda de instalações, pelo tempo e dinheiro despendidos na recuperação, pelo enfraquecimento ou perda da imagem da companhia, etc (CASAL, 2008).

2.3 BARREIRAS DE SEGURANÇA

O modelo do queijo suíço desenvolvido por James Reason vem sendo citado com frequência para explicar a ocorrência de acidentes. Este modelo envolve uma sucessão de

camadas de defesa (fatias do queijo) separando um evento indesejável dos perigos que o originam. Cada fatia possui furos em constante movimento, abrindo e fechando. Quando uma série completa de buracos alinha-se, uma trajetória passa através de todas as defesas, causando um acidente (REASON, 2008). A Figura 1 ilustra este modelo.

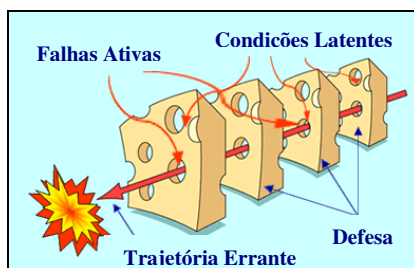


Figura 1: O modelo do queijo suíço de James Reason descrevendo a ocorrência de acidentes.
Fonte: <http://www.hf.faa.gov/webtraining/teamperform/TeamCRM009.htm>.

Trazendo este modelo para a realidade das indústrias químicas, as barreiras de segurança constituem medidas para redução de risco e são implementadas em diferentes níveis ou camadas de proteção, conforme a Figura 2. Algumas barreiras são preventivas e se situam antes do acontecimento da situação de risco, sendo representadas, por exemplo, pelo próprio projeto do processo, pelos controles básicos, alarmes e sistemas de intervenção (sistemas de supervisão, sirenes, botões de emergência etc.) e pelos sistemas instrumentados de segurança (estes últimos serão mais bem aprofundados ao longo do trabalho).

Há ainda barreiras criadas para minimizar as consequências de um evento danoso e reduzir o risco de acontecimentos ainda mais graves: as chamadas “barreiras mitigadoras” englobam, dentre outros, dispositivos de alívio (válvulas de alívio, pinos de segurança, drenos etc.), barreiras de contenção (diques, paredes corta-fogo etc.), planos de manobras de emergência (bombas de incêndio, brigadas, corpo de bombeiros, procedimentos de evacuação de área etc.) e mecanismos de resposta da comunidade (médicos, hospitais, corpo de bombeiros ou qualquer outro método ou ferramenta que não faça parte dos recursos da empresa). O conceito de barreiras de segurança, abrangendo todo o ciclo de vida da fábrica, pode ser estendido e compreender serviços de manutenção (planos de manutenção preditiva e preventiva, bem como ações corretivas), procedimentos e práticas internos à companhia, treinamentos e capacitações etc (SAKAMOTO, NUNES, 2010).

A associação do modelo do queijo suíço e de barreiras de proteção indica que um acidente (também chamado cenário de emergência) ocorre quando uma barreira falha. Atualmente, a Segurança de Processo adota a gestão sobre barreiras de proteção para manter o

risco a níveis aceitáveis. Idealmente, apenas uma camada deve funcionar perfeitamente para que um evento indesejável seja evitado. Contudo, como cada camada não é perfeitamente eficaz, novas barreiras devem ser criadas de forma que o risco do acidente se torne tolerável. A interação entre estes dois modelos não é estática, e a classificação de um cenário de emergência em baixo, médio ou alto risco não é necessariamente fixa: dependendo de como as barreiras de proteção de um determinado cenário de emergência forem gerenciadas, a classificação do risco de um cenário pode mudar.

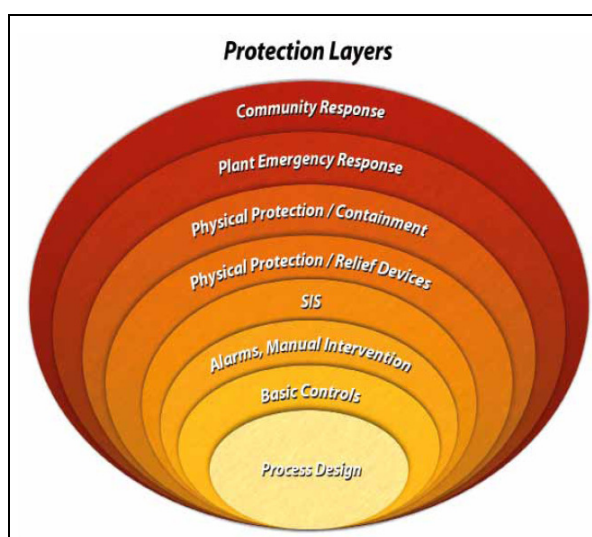


Figura 2: Distribuição em camadas de barreiras de proteção.

Fonte: ISA InTech n° 122, 2010.

2.4 SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURANÇA

Sistemas instrumentados de segurança (SIS), sistemas de intertravamento de segurança ou sistemas de desligamento de emergência são uma classe de sistemas de proteção instrumentada responsáveis pela segurança operacional de unidades e equipamentos industriais (CHAME, 2007). São denominações genéricas que contemplam todos os sistemas de segurança que, para a realização de uma ou mais funções de segurança (FIS), utilizam tipicamente uma combinação de três elementos:

- um ou mais elementos sensores, que monitoram o processo com o objetivo de detectar uma perturbação ou condição anormal (por exemplo, um transmissor de pressão);

-
- um ou mais elementos de lógica, que recebem o sinal do(s) sensor(es) ou transmissor(es), determinam se a condição representa um perigo e, se verdadeira, enviam um sinal para que seja executada determinada ação;
 - um ou mais elementos finais de controle, que recebem o(s) sinal(is) proveniente(s) do(s) elemento(s) de lógica e implementam a ação apropriada (por exemplo, abrindo ou fechando uma válvula) (CCPS, 07/2009).

Tipicamente, um SIS atua de maneira automática com pelo menos uma das funções abaixo:

- como um sistema de vigia, monitorando o processo independentemente do sistema de controle e atuando quando um limite pré-determinado é alcançado;
- como um sistema passivo, evitando que um equipamento opere sem que seja satisfeita uma série de condições indicando que é seguro prosseguir;
- como um sistema ativo, intervindo na operação se determinada série de condições indicadoras de perigo potencial ocorrer.

Cabe aqui fazer a distinção entre sistema de controle e sistema de segurança. O primeiro é projetado para corrigir uma variável quando ela desvia de seu *set point* e mantê-la dentro de um limite pré-estabelecido, além de prevenir que o processo saia de controle devido à falha de apenas um componente. Já um sistema de segurança é projetado para evitar – ou pelo menos minimizar – acidentes. Ele atua automaticamente quando o sistema de controle falha em manter o processo dentro dos limites pré-determinados, mas também garante uma condição segura antes da realização de determinada ação. O sistema de segurança tem em seu centro um intertravamento de segurança e deve ser capaz de, numa emergência, ultrapassar e sobrepor o sistema de controle e, não raro, muitas das ações dos operadores (PALLUZZI, 1994). O SIS não deve ser entendido como a instrumentação que impede a planta de funcionar, mas sim que a mantém segura (CHAME, 2007).

2.5 NÍVEL DE INTEGRIDADE DE SEGURANÇA – SIL

Constituindo uma das barreiras mais eficazes na prevenção de acidentes de processo, os SIS precisam de uma classificação normativa que assegure sua funcionalidade em caso de emergência. Neste contexto, surge a classificação em níveis de integridade de segurança (SIL – *safety integrity levels*), indicadores da confiabilidade requerida para as FIS e representações estatísticas do desempenho dos SIS. O conceito de SIL é reconhecido mundialmente para instalações de segurança e, ao mesmo tempo em que permite àquele que projeta e opera a

planta definir as exigências para os SIS em função dos danos potenciais em caso de acidente, fornece aos fabricantes dos equipamentos e instrumentos um modo de descrever o comportamento de falha dos mesmos (CHAME, 2007).

Define-se o SIL como uma faixa de probabilidade de falha na demanda (PFD). Ele representa a magnitude da redução de risco que um SIS deve ser capaz de oferecer quando um evento perigoso gera uma demanda por sua atuação. No projeto de um SIS, dois tipos de especificações são requeridas: a especificação da função e do seu nível de confiabilidade, a PFD. O SIL remete à segunda, indicando a probabilidade mínima de funcionamento adequada ao SIS, ou seja, se o mesmo executará, quando de uma demanda, a(s) FIS para a(s) qual(is) foi projetado (CHAME, 2007).

Adotar-se-á aqui a definição de valores de SIL apresentadas nas normas IEC-61508 e IEC-61511, conforme aa Tabela 1:

Tabela 1: Níveis de integridade de segurança e seus atributos.

SIL	PFD	FRR*	Disponibilidade
1	$\geq 10^{-2}$ a $< 10^{-1}$	1 a 10 %	90,00 a 99,00 %
2	$\geq 10^{-3}$ a $< 10^{-2}$	0,1 a 1 %	99,00 a 99,90 %
3	$\geq 10^{-4}$ a $< 10^{-3}$	0,01 a 0,1 %	99,90 a 99,99 %
4	$\geq 10^{-5}$ a $< 10^{-4}$	0,001 a 0,01%	99,99 a 99,999 %

* Fator de redução de risco, definido como o inverso da PFD.

Fontes: Norma IEC-61511; CHAME, 2007.

Percebe-se da Tabela 1 que o valor de SIL aumenta com a diminuição da PFD. O SIL adequado para um SIS é, portanto, aquele que faz com que o risco inerente ao processo seja igual ou menor do que o risco aceitável, proporcionando assim a segurança necessária para a operação da planta (CHAME, 2007).

2.5.1 CICLO DE VIDA DE SEGURANÇA

O entendimento da definição de ciclo de vida de segurança é muito importante para se compreender a amplitude do conceito de SIL. O ciclo de vida de segurança é também tema-chave de diversas normas que tratam de SIL, posteriormente abordadas neste trabalho. Uma definição formal para ciclo de vida de segurança seria, segundo Goble e Cheddie (2005) apud Chame (2007), a de “um processo de engenharia que utiliza etapas específicas para garantir que o SIS é efetivo na sua missão-chave de redução de risco, bem como custo-eficiente em relação à vida do sistema”. Este conceito envolve, de forma simplificada, três fases: análise, implementação e operação, esquematizadas na Figura 3.

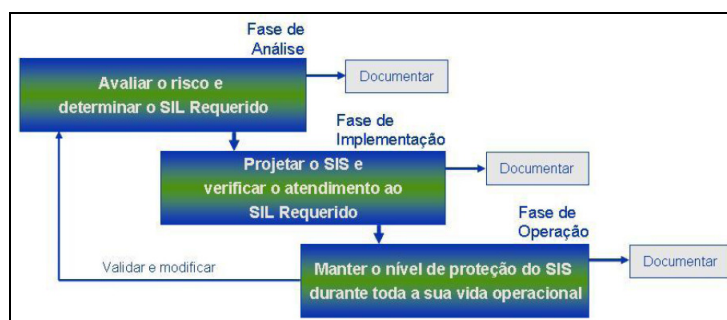


Figura 3: Esquema do ciclo de vida de segurança de um SIS.

Fonte: CHAME, 2007.

Na primeira fase, de análise do problema, os requisitos de desempenho do SIS são definidos através do “SIL requerido”. Procedem-se a uma análise de riscos e a considerações sobre outras camadas de proteção existentes além daquelas providas pelo SIS (vide Figura 2). Assim sendo, identifica-se e se avalia o risco, estima-se a redução de risco necessária e se determina o SIL requerido para o SIS. É esta etapa que serve de base para este trabalho. É útil dizer aqui que existem várias metodologias para se determinar o SIL requerido, sejam elas qualitativas, semi-qualitativas ou quantitativas. É uma etapa fundamental que passa sempre por uma avaliação com componentes subjetivos (CHAME, 2007).

Na fase de implementação, de posse do SIL requerido, faz-se o projeto do SIS. Consideram-se todas as alternativas de implementação, que incluem, além da escolha do nível de redundância de cada parte do sistema, o estabelecimento dos intervalos de teste do sistema, o fator de cobertura do diagnóstico (que mede a probabilidade de que uma falha interna seja detectada on-line por um equipamento), as defesas contra as falhas de causa comum (falhas de componentes redundantes num mesmo momento), dentre outros (CHAME, 2007).

Na fase de operação, visa-se assegurar que o nível de segurança fornecido pelo SIS seja mantido durante toda a vida do sistema, da instalação ao descomissionamento, passando pelas atividades de operação, manutenção, partidas e paradas. Também são coletados dados de campo para validarem as análises realizadas nas etapas anteriores, ajustando-se as condições do sistema em função dos resultados desta validação (CHAME, 2007).

2.5.2 CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS A RESPEITO DO SIL

A combinação da análise de confiabilidade e do custo do ciclo de vida de um sistema de segurança é, sem dúvida, um critério decisório na avaliação das alternativas de projeto de SIS, sendo que a primeira avaliação deve sempre ter prioridade sobre a segunda. Dentre as várias configurações possíveis que atendem ao SIL requerido, deve-se sempre buscar o compromisso ideal entre segurança, desempenho e custos. Muitos projetos de redução de

risco são financeiramente inviáveis por proporem um nível de redução de risco desnecessariamente grande ou por, ao apenas garantirem o nível de segurança, não otimizarem o custo do ciclo de vida do SIS (CHAME, 2007).

O custo do ciclo de vida do SIS é o custo total imposto por ele durante o seu período de vida útil, englobando custos de aquisição, instalação, operação, manutenção (corretiva e preventiva), parada, ambientais e de descomissionamento. Nenhum destes custos é negligenciável; em particular, a operação e a manutenção dos sistemas de segurança industriais merecem uma atenção específica enquanto fonte de poupança de custos, particularmente devido à minimização dos custos decorrentes de tempos de parada de produção. Por sua vez, o benefício resultante da implementação de um SIS apropriado, tanto do ponto de vista de SIL quanto financeiro, é obtido considerando-se a redução das perdas esperadas devido a acidentes, a redução das perdas devidas a falhas espúrias, a minimização de despesas com a manutenção e a operação dos componentes, a redução das contramedidas de mitigação de emergências, etc (CHAME, 2007).

2.5.3 NORMAS RELACIONADAS

Várias normas acerca do desenvolvimento, do projeto e da manutenção dos SIS foram editadas. Dentre elas estão a IEC-61508, a IEC-61511, a ANSI/ISA-S.84.01 e a PETROBRAS N-2595. Na maior parte dos países, assim como no Brasil, estas normas não são de aplicação obrigatória, mas são publicações básicas de segurança empregadas por comitês técnicos na preparação de normas e por diversas empresas (CHAME, 2007).

IEC-61508

Criada em 1984 pela IEC (*International Electrotechnical Commission*), a norma internacional IEC-61508 tem o intuito de atender mundialmente às necessidades de segurança face à crescente demanda por produtividade e tecnologia por parte dos diversos setores industriais. Sua aprovação integral data de 1999. A IEC-61508 pode ser aplicada diretamente a qualquer processo industrial que utilize produtos e sistemas de segurança E/E/PE (elétricos/eletrônicos/eletrônicos programáveis), independentemente do tipo de aplicação a que se destinem. Ela trata tanto do conceito de SIL quanto do de ciclo de vida de segurança (vide item 2.5.1), abordando ainda critérios de *performance* SIL e considerações específicas de *hardware* e *software* dos sistemas relacionados à segurança. Estes fatores, juntamente com o caráter genérico da norma, tornaram-na mais conhecida como uma norma para fabricantes e fornecedores de sistemas relacionados à segurança (CHAME, 2007).

Da norma IEC-61508 derivaram outras três: a IEC-62061, para o setor de maquinário, a IEC-61513, para a área nuclear e a IEC-61511, para as indústrias de processo .

IEC-61511

Lançada em 2003, a norma internacional IEC-61511 é voltada especificamente às indústrias de processo. Ela incorpora às boas práticas de engenharia da IEC-61508 variadas normas internacionais e experiências específicas do setor de processos. Em sua primeira parte, cobre o ciclo de vida do sistema de segurança (incluindo gerenciamento da função de segurança, Análise de Riscos e Perigos e etapas indo do projeto ao descomissionamento do SIS). Na segunda, apresenta orientações gerais para o uso da primeira parte. Por fim, a terceira parte apresenta orientações detalhadas para o atendimento ao SIL (englobando metodologias qualitativas e quantitativas) (CHAME, 2007).

NORMAS ISA

A ISA (*International Society of Automation*) é uma entidade mundial que estabelece normas, padrões e práticas para o setor de automação e controle. Publicou em 2004 a ANSI/ISA-84.00.01-2004, com padrões para a utilização de sistemas eletrônicos programáveis. Esta norma corresponde essencialmente à IEC-61511, apenas acrescentando um nova cláusula, denominada “*Grandfather Clause*” e considerando apenas os níveis de SIL 1, 2 e 3. Mediante a apresentação de boas práticas de Engenharia, ela permite manter um SIS anteriormente projetado (com base em boas práticas de engenharia reconhecidas e aceitas) sem que, para isso, precisem atualizá-lo para a norma atual (CHAME, 2007).

PETROBRAS N-2595

Em 1997, a Petrobras elaborou a norma PETROBRAS CONTEC N-2595. Desde lá, duas revisões ocorreram, a primeira em julho de 2002 e a segunda em outubro de 2002, denominada PETROBRAS N-2595 rev. B. Esta norma é de titularidade exclusiva da Petrobras e é destinada ao uso interno da companhia.

Baseia-se em parte nas outras normas já apresentadas e traz critérios de definição, projeto, implementação, testes e manutenção de sistemas instrumentados de segurança em unidades industriais tendo em vista a classificação em níveis de SIL. Diferentemente de outras normas, a PETROBRAS N-2595 não obriga à total separação entre os sistemas de controle e os SIS. Para os níveis de risco menores, ela recomenda o uso do próprio SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído, elemento da área de automação industrial dedicado ao controle de processos). Equipamentos mais especializados e adequados são reservados à proteção de malhas envolvendo riscos maiores (CHAME, 2007).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentam-se o método-base escolhido para a determinação do SIL e dois procedimentos computacionais: o primeiro é utilizado para a definição do SIL requerido, e o segundo visa à realização da análise de sensibilidade.

3.1 MÉTODO DO GRÁFICO DE RISCO CALIBRADO

Para a realização deste trabalho, emprega-se o método conhecido como metodologia do gráfico de risco calibrado, abordado na terceira parte da primeira edição (2003) da norma IEC-61511. Com ele, avaliam-se os parâmetros de risco:

- consequências (C), ligadas a ocorrência de lesões e mortes, perdas materiais e/ou danos ambientais no caso em que o sistema de segurança não existisse ou não executasse sua função quando demandado;
- tempo de exposição (F), interpretado como a porcentagem de tempo em que a zona exposta ao perigo está ocupada;
- probabilidade de evitar o evento perigoso (P), a qual representa a probabilidade de que se consiga evitar, por outros modos que não o SIS em questão, o evento perigoso no caso de falha na demanda;
- taxa de demanda do sistema de segurança (W), correspondendo à provável frequência anual de acontecimento do evento perigoso em caso de ausência do SIS.

A Tabela 2 a seguir sintetiza os parâmetros, suas categorias, subcategorias e respectivas interpretações, tendo como base a norma IEC-61511.

Tabela 2: Categorias e subcategorias do método do gráfico de risco calibrado.

PARÂMETRO DE RISCO		DESCRIÇÃO
C	C _A	C _{A1} Pequenas lesões; pequena liberação de produto inflamável ou tóxico.
		C _{A2} Em termos ambientais, evento com pequeno impacto, sem gravidade, que deve ser comunicado à direção da unidade industrial.
		C _{A3} Perdas econômicas baixas.
	C _B	C _{B1} Invalidez ou morte de uma pessoa; importante liberação de produto tóxico ou inflamável.
		C _{B2} Em termos ambientais, evento restrito aos limites da empresa com dano significativo.
		C _{B3} Perdas econômicas de médias a elevadas.
	C _C	C _{C1} Morte de algumas pessoas; importante liberação de produto muito tóxico ou inflamável com probabilidade de incêndio.
		C _{C2} Em termos ambientais, evento que ultrapassa os limites da empresa, com dano grave, mas de rápida resolução e com consequências duráveis.
		C _{C3} Perdas econômicas muito elevadas.
	C _D	C _{D1} Morte de muitas pessoas; ruptura ou explosão.
		C _{D2} Em termos ambientais, evento que ultrapassa os limites da empresa, com dano grave de difícil resolução e com consequências duráveis.
		C _{D3} Perdas econômicas extremamente elevadas.
F	F _A	Ocupação humana de rara a relativamente frequente.
	F _B	Ocupação humana de frequente a permanente.
P	P _A	São satisfeitas as seguintes condições: há meios de indicação de falha no SIS, há meios independentes de parada do processo para evitar o perigo, o intervalo entre a percepção de um incidente e o evento perigoso supera 1 hora ou é suficiente para implementar ações corretivas.
	P _B	Não são satisfeitas as condições acima.
W	W ₁	Demanda muito baixa. Na ausência do SIS, o evento perigoso ocorreria até 0,1 vezes por ano.
	W ₂	Demanda baixa. Na ausência do SIS, o evento perigoso ocorreria entre 0,1 e 1 vez por ano.
	W ₃	Demanda alta. Na ausência do SIS, o evento perigoso ocorreria entre 1 e 10 vezes por ano.

Trata-se de um método semi-qualitativo que determina valores numéricos para alguns dos parâmetros de risco acima citados e permite sua definição para os outros. Conforme a própria norma recomenda, os valores e suas interpretações, os quais tentam caracterizar quantitativamente informações muitas vezes de cunho majoritariamente qualitativo ou dificilmente mensuráveis, podem ser judiciosamente modificados para se aproximarem o melhor possível das características da aplicação em questão. Posteriormente, no capítulo 5.1, serão apresentadas faixas de valores atribuídas a cada uma das subcategorias. É útil observar que cada uma das categorias do parâmetro C (C_i – C_A, C_B, C_C e C_D) possui 3 subcategorias, associadas ao risco pessoal (1), ambiental (2) e econômico (3) (C_{ij} – C_{A1}, C_{A2} e C_{A3}; C_{B1}, C_{B2} e C_{B3}; C_{C1}, C_{C2} e C_{C3}; C_{D1}, C_{D2} e C_{D3}). Partindo do princípio de que a gravidade do evento

aumenta com i de A a D independentemente de j , a categoria C_i adotada é aquela que estiver associada ao “maior” índice i . Assim sendo, por exemplo, se ocorrerem C_{A2} , C_{B3} e C_{D1} , a resultante será o pior caso, ou seja, C_D .

Uma vez realizada a seleção dos parâmetros, utiliza-se o gráfico de risco mostrado na Figura 4 para a leitura da combinação destes parâmetros e seleção do mínimo SIL requerido para dado SIS. Se, por exemplo, com base na Tabela 2, adotam-se as variáveis C_C , F_A e P_B , obtém-se X_4 na Figura 4; na sequência, associando X_4 a W_3 , o valor de saída é (SIL) 3.

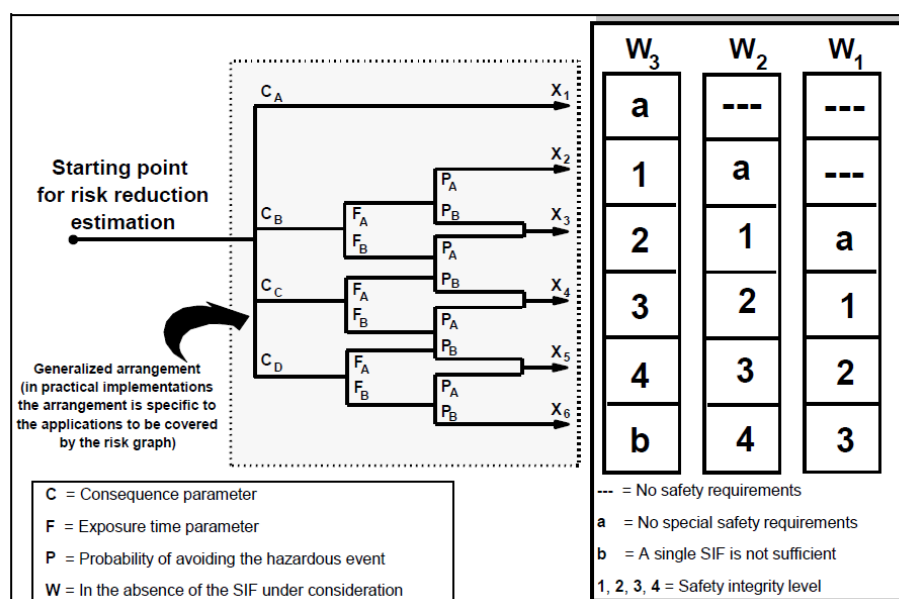


Figura 4: Gráfico de Risco Calibrado empregado para a determinação do SIL requerido.

Fonte: IEC-61511.

3.2 METODOLOGIA COMPUTACIONAL

A implementação computacional neste trabalho foi realizada no ambiente de otimização GAMS[®] (*General Algebraic Modeling System*) e foi dividida em dois modelos:

- M1, para a determinação do SIL requerido (solução nominal);
- M2, para a análise de sensibilidade.

Os problemas são do tipo MILP e foram implementados em GAMS[®] por ser este um sistema de modelagem próprio para problemas de otimização envolvendo conjuntos de equações algébricas com funções objetivo sujeitas a restrições, tendo vários métodos para resolver MILPs.

3.2.1 MODELO COMPUTACIONAL PARA A DETERMINAÇÃO DO SIL REQUERIDO

Para a determinação do SIL requerido (SIL_0), criou-se um modelo computacional, M1, que corresponde e descreve fielmente o gráfico de risco calibrado apresentado na Figura 4. De fato, é possível assimilar tal gráfico a um algoritmo que, a dadas entradas C, F e P, associa uma única variável de saída X. Esta, por sua vez, quando combinada com a entrada W, resulta num único valor final de saída, o nível de integridade de segurança requerido, SIL_0 .

Para sua prévia definição, a cada parâmetro corresponde uma faixa de valores pré-determinada pelo usuário (capítulo 5.1). Para a realização das combinações entre os parâmetros adotados, é natural a utilização dos operadores lógicos E (\wedge), OU (\vee), NÃO (\neg) e IMPLICÂNCIA (\Rightarrow). O problema é inteiramente descrito em termos de sentenças lógicas num primeiro momento. Em seguida, valendo-se das relações apresentadas por Raman e Grossmann (1990), o problema é expresso em termos de equações e inequações lineares.

Inicialmente, mediante a Tabela 2, um evento E e sua respectiva variável binária $y \in \{0,1\}$ são associados a cada categoria (A, B, C, D) inerente ao parâmetro de riscos C; a cada categoria (A e B) inerente a F; a cada categoria (A e B) inerente a P e a cada categoria (1, 2, e 3) inerente a W. Da combinação destas variáveis, decorrem as categorias 1, 2, 3, 4, 5, e 6 inerentes ao parâmetro X. A variável y assume valor 1 se o evento E ocorre e zero em caso contrário. Dessa forma, cada saída do gráfico de risco calibrado (SIL requerido) pode ser mapeada por um conjunto de variáveis binárias (item 2, Apêndice 1). Restrições existem para as condições de exclusividade dos eventos para cada categoria (item 1, Apêndice 1). Adicionalmente, foram definidas variáveis binárias y_{Si} para representar as sete categorias do gráfico de risco da Figura 4 (---, a, 1, 2, 3, 4, b) de acordo com o item 3 do Apêndice 1. De posse de y_{Xi} e y_W e por intermédio de y_{Si} , uma equação retorna, na variável y_{SIL} , o valor correspondente ao SIL que seria lido no gráfico de risco calibrado (itens 4, 5, 6, Apêndice 1).

Variáveis binárias y_{Cij} , são associadas ao evento de ocorrência do parâmetro de risco C na categoria i e na subcategoria j . Uma vez com estas variáveis, é possível escrever relações lógicas que definem o pior caso (itens 7, 8, Apêndice 1). Para associar as variáveis binárias às faixas relativas aos parâmetros (Tabela 4), disjunções (equações condicionais) são adicionadas ao modelo (uma disjunção é associada a uma variável binária e, dado um conjunto de disjunções, apenas uma é verdadeira), conforme o item 9 do Apêndice 1.

Por fim, o modelo M1 consiste num em um sistema de equações algébricas, em sua grande maioria restrições de desigualdade. Encontrar o SIL requerido para um dado conjunto de entrada se torna possível resolvendo-se um problema de otimização MILP (*mixed integer*

linear programming) cujo espaço de soluções viáveis seja definido por estas equações. Nesse caso, o problema é degenerado. Ou seja, a função objetivo é uma constante e as condições de otimalidade do problema garantem a convergência das equações. Através deste programa tem-se uma maneira genérica, sistemática e computacional para a determinação do SIL requerido. No Apêndice 2 encontra-se a implementação de M1 em GAMS[®].

3.2.2 MODELO COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA DETERMINAÇÃO DO SIL

Para realizar a análise de sensibilidade dos dados de entrada do problema no valor final de SIL, foi criado o modelo M2, um problema de otimização que visa descobrir qual a menor variação dos parâmetros capaz de mudar de categoria o SIL inicialmente determinado (lembrando que não há valores intermediários de SIL). Este programa permite ainda determinar o parâmetro (ou seu conjunto) mais sensível para a determinação do SIL.

A cada parâmetro nominal x_N , corresponde uma variável contínua x (de domínio conhecido), de forma que a distância ao cenário nominal é definida como $d = |x - x_N|$. Mais precisamente, uma vez fornecidos todos os valores de entrada correspondentes às diferentes subcategorias da Tabela 2 e levando-se em consideração os limites das faixas de valores de cada subcategoria, o modelo M2 busca, sujeito às restrições do modelo M1 e à restrição de que o “novo” SIL deve ser diferente do SIL requerido ($SIL \neq SIL_0$), a menor soma de distâncias aos cenários nominais de todos os parâmetros, conforme o item 10 do Apêndice 1.

A utilização da função módulo permite que a categoria de SIL aumente ou diminua. Posto que a função módulo não é linear, quando de sua implementação, utilizou-se um artifício algébrico baseado em desigualdades para reescrevê-la (item 11, Apêndice 1). Além disso, como os parâmetros têm diferentes unidades e ordens de grandeza, no modelo, eles foram todos escalonados e variam de 0 a 1. A restrição de que o SIL seja diferente do SIL_0 não pode ser implementada diretamente, podendo ser modelada através de uma disjunção lógica (item 12, Apêndice 1) combinada com uma restrição lógica (item 13, Apêndice 1), usando uma tolerância ϵ (0.001).

Tem-se com M2, portanto, um modelo genérico, sistemático e computacional para a realização de análises de sensibilidade na determinação do SIL. Para sua utilização, o usuário deve apenas fornecer as faixas de valores escalonados associadas aos parâmetros e os valores pontuais que estima para cada subcategoria. No Apêndice 2, pode-se verificar a implementação, em GAMS[®] de M2.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO

4.1 A EMPRESA

O caso estudado neste trabalho localiza-se na Unidade de Triunfo da companhia Oxiteno Nordeste S.A. Indústria e Comércio. A unidade industrial está situada no Pólo Petroquímico de Triunfo, no município de Triunfo, Rio Grande do Sul. A Oxiteno, empresa pertencente ao grupo empresarial brasileiro Ultrapar, é líder nos segmentos em que atua, e a Unidade Triunfo destaca-se como a única produtora nacional dos solventes sec-butanol e metil-etil-cetona.

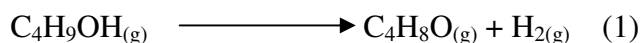
4.2 O PROCESSO PRODUTIVO

A Oxiteno Triunfo é especializada na produção dos solventes oxigenados sec-butanol (SBA) e metil-etil-cetona (MEC), sendo o álcool matéria-prima para a produção da cetona. Na Figura 5, encontra-se um esquema do processo produtivo completo.

O SIS abordado neste trabalho está localizado na etapa de purificação de MEC. Por esta razão, apenas o processo produtivo de MEC será explicado.

4.2.1 PROCESSO PRODUTIVO DE METIL-ETIL-CETONA

A metil-etil-cetona é obtida pela desidrogenação do sec-butanol na presença de um catalisador sólido conforme a reação química (1) abaixo:



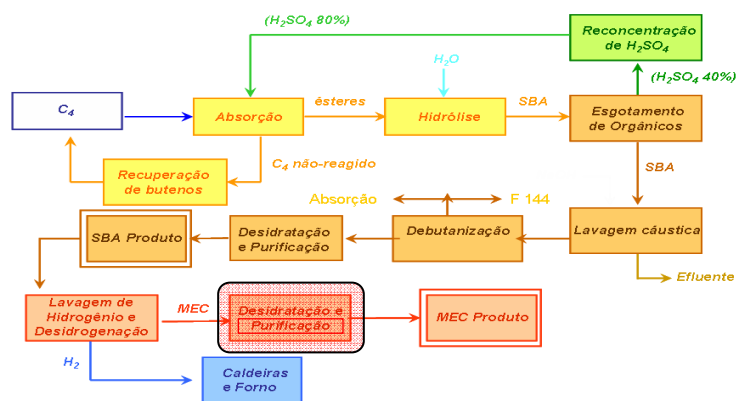


Figura 5: Esquema do processo produtivo da Oxiteno Triunfo, com ênfase para a etapa relacionada a este trabalho: purificação de MEC.

Fonte: Documentação interna da Oxiteno.

Antes de sofrer esta reação, a corrente de SBA produto passa por uma coluna recheada que lava e resfria uma corrente de H_2 (produto da reação (1)) proveniente da descarga de um compressor. Do topo desta coluna, o H_2 é enviado como combustível para forno e caldeiras. O SBA, produto de fundo, é bombeado para o sistema de reação da área de desidrogenação.

A corrente de SBA é aquecida sucessivamente em diversos trocadores de calor e finalmente vaporizada; a vaporização, realizada por intermédio de vapor d'água, é facilitada por borbulhamento do meio com a corrente quente de H_2 efluente do reator de desidrogenação. A reação (1) ocorre num reator multitubular e é endotérmica, o calor requerido para a reação sendo fornecido por um sistema de sais fundidos. A corrente efluente do reator é resfriada e parcialmente condensada, promovendo-se a separação da corrente gasosa de H_2 (alinhada para o compressor supracitado) e do MEC bruto (fase líquida), este último seguindo para as etapas de desidratação e de purificação, conforme a Figura 5.

A etapa de desidratação visa à separação, por destilação na coluna de pratos de *tag* D-610, de água e MEC. O produto de topo desta coluna, composto de traços de MEC, SBA, butenos e água, serve de vapor de aquecimento de um dos refeedores (E-621) da coluna de purificação subsequente (D-620), através de um mecanismo de integração energética. No E-621, ele condensa, sendo em seguida resfriado no trocador de placas E-613 e no trocador bitubular E-612. Esta corrente chega ao vaso F-612 e se separa em três fases. A fase aquosa vai para os vasos F-240 ou F-445, a fase orgânica é refluxada via bombas G-612 A e/ou G-612 B (servindo ainda de fluido frio no trocador E-612) e a fase gasosa é utilizada para pressurização do vaso, com alívio para *flare*. O refeedor da coluna possui *tag* E-611. O produto de fundo da coluna é constituído por MEC especificado em água, mas ainda com SBA e outros compostos pesados. Por esta razão, ele é enviado para a etapa de purificação na

coluna de *tag* D-620. Cabe lembrar que é para a segurança operacional desta coluna que se implementou o SIS objeto deste trabalho.

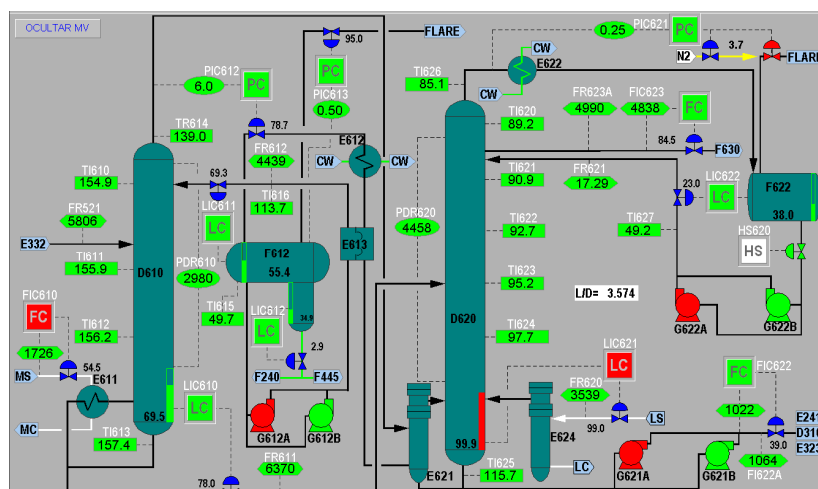


Figura 6: Tela do painel de controle com as etapas de desidratação e purificação de MEC.

Fonte: Documentação interna da Oxiteno.

Na coluna de pratos D-620, o teor de MEC na corrente de produto final é elevado, por destilação a, no mínimo, 99,7%. O MEC especificado é retirado no prato 65, é resfriado no E-623 e enviado para tancagem (tanques F-630 A, F-630 B e F-640). Estas duas últimas etapas são visualizadas na Figura 7. O vapor de topo da coluna é condensado no trocador casco-tubo E-622 e vai ao vaso F-622. Neste, a fase gasosa é enviada para *flare*, e a fase líquida é refluxada para a D-620 via bombas G-622 A e/ou G-622 B. Os refeedores da coluna são os equipamentos de *tags* E-621 e E-624. O primeiro é responsável pelo principal suprimento energético da coluna, de forma que o E-624 apenas complementa sua atuação. O produto de fundo da coluna é rico em SBA, retornando para a etapa de desidratação e purificação de SBA da Figura 6. A coluna D-620 opera a uma temperatura de aproximadamente 116°C no fundo e 85°C no topo e a uma pressão manométrica com *set point* em 24517 Pa (0,25 kgf.cm⁻²).

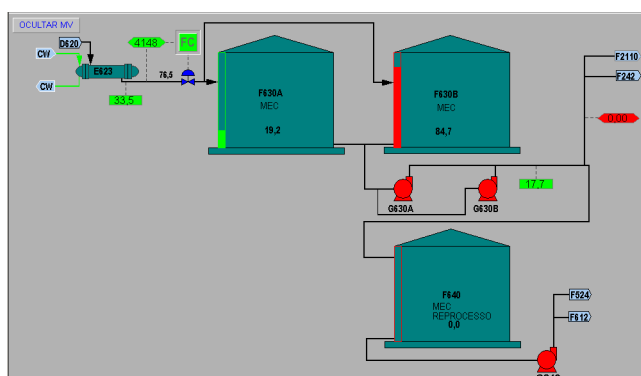


Figura 7: Tela do painel de controle com as etapas de condensação e estocagem de MEC.

Fonte: Documentação interna da Oxiteno.

4.3 SISTEMA DE PROTEÇÃO DA COLUNA D-620

A Oxiteno Triunfo dispõe de um amplo sistema de segurança, que está de acordo com a Figura 2. Em especial, mantém um completo sistema de intertravamentos de segurança distribuídos por todas as etapas do processo apresentado na Figura 5.

4.3.1 APRESENTAÇÃO DO SIS DA D-620

Conforme mencionado no item 4.2, este trabalho concentra-se no SIS da coluna de purificação de MEC, D-620. Esta torre de destilação é protegida pelo intertravamento de segurança I-07, composto de 4 FIS, conforme a Tabela 3. A atuação destas FIS pode se dar de maneira independente, isto é, todas as FIS não precisam ser acionadas simultaneamente.

A FIS I-07.1 protege contra pressão alta na coluna. O elemento sensor, PSH-622, ao alarmar através do alarme PAH-622 a partir de 176520 Pa (pressão manométrica), bloqueia a admissão de vapor de aquecimento no refeedor da coluna D-610 via FV-610 e no refeedor E-624 da D-620 via LV-621 (vide Figura 6 para melhor visualização).

Quando o nível na D-620 baixar de 20%, o LIC-621 alarmará e bloqueará o vapor de aquecimento do E-624 através da LV-621. Esta é a ação da FIS I-07.2.

A FIS I-07.3 também bloqueia a LV-621, porém apenas quando o TI-625 detectar uma temperatura de fundo superior a 118 °C.

Por fim, a FIS I-07.4 age através do fechamento da FV-623 (válvula de controle de retirada de MEC após o resfriador E-623 da Figura 7) quando o valor de pressão diferencial na coluna, medido pelo PDR-620, ultrapassar o valor de 29420 Pa.

Tabela 3: Composição do intertravamento de segurança I-07 da coluna de purificação de MEC D-620.

FIS	ELEMENTO SENSOR	ALARME	SET POINT DO ALARME	AÇÃO / ATUADOR
I-07.1	PSH-622	PAH-622, pressão alta na D-620	176520 Pa (1,8 kgf/cm ²)	Bloqueia FV-610 Bloqueia LV-621
I-07.2	LIC-621	Nível baixo na D-620	20 %	Bloqueia LV-621
I-07.3	TI-625	Temperatura de fundo alta na D-620	118 °C	Bloqueia LV-621
I-07.4	PDR-620	Pressão diferencial alta na D-620	29420 Pa (3000 mmH ₂ O)	Fecha FV-623

Fonte: Documentação interna da Oxiteno.

4.3.2 POSSÍVEIS CONSEQUÊNCIAS DE FALHAS NO I-07

Em caso de falha na demanda da FIS I-07.1, ocorreria pressurização excessiva da coluna D-620 e de suas linhas. As principais conseqüências poderiam ser:

- o rompimento de juntas, conexões e tubulações, com liberação de produto inflamável líquido e gasoso. Além do evidente risco de formação de nuvem explosiva (cuja extensão pode atingir o tamanho mostrado no Anexo 1), ocorreriam também perdas de produção por perda de produto, o produto vazado geraria inevitavelmente uma maior carga de efluentes líquidos e gasosos e exporia a riscos os trabalhadores próximos;
- a modificação do perfil de operação da coluna, alterando equilíbrios e gerando produtos de composição e risco desconhecidos. Ocorre, portanto, saída de especificação da carga, o que acarreta perda de produção e “geração” de efluente e/ou produto a ser reprocessado.

Já uma falha da FIS I-07.2 manteria nível baixo na coluna com conseqüente redução da área de troca térmica nos refeedores. Assim sendo:

- ocorreria pressurização excessiva dos refeedores, implicando em riscos tanto a estes equipamentos quanto àqueles situados a suas montantes (especialmente a coluna D-610) e jusantes, assim como às tubulações;
- a pressão da D-620 seria reduzida dada a redução na vaporização nos refeedores, modificando o perfil operacional da coluna e gerando perdas de produção;
- embora esta situação não seja diretamente evitada pela FIS I-07.2, não se pode esquecer que, caso o nível subisse rapidamente (por exemplo, na tentativa de controle da situação), uma ebulição brusca ocorreria nos refeedores, com vultoso arraste de líquido e risco de danos (inclusive rompimento e queda) de pratos.

No caso de elevação excessiva da temperatura de fundo por falha na FIS I-07.3:

- poderia ocorrer degradação do produto de fundo, com possibilidade de geração de compostos de inflamabilidade, explosividade e toxicidade desconhecidas. Além disso, poder-se-ia atingir, em princípio, a temperatura de auto-ignição destes compostos;
- com a alteração do perfil de operação da coluna, os produtos de fundo, do prato 65 e de topo sairiam de especificação, este último devido à maior passagem de pesados para o topo.

Por fim, a falha na demanda da FIS I-07.4 ocasionaria uma diferença de pressão muito grande entre o fundo e o topo da coluna. Tipicamente, essa situação corresponderia ao caso em que o nível na coluna estaria excessivamente alto. Neste caso:

- a estrutura de sustentação da torre e de seus alinhamentos poderia não suportar o peso da coluna de líquido e romper-se, com consequências totalmente catastróficas. Pode-se citar a perda exagerada de produto líquido e gasoso, a formação de nuvem de vapor, danos importantes aos diversos equipamentos situados nas imediações da coluna (efeito dominó (CASAL, 2008)), elevado risco direto a todos os trabalhadores na área industrial, excessiva perda de produção e geração de efluentes, dentre outros;
- haveria o risco de passagem de produto líquido pelo topo para etapas posteriores do processo, gerando contaminações e distúrbios operacionais generalizados.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, a apresentação dos resultados e suas discussões seguem uma sequência lógica, conforme apresentado no capítulo 3. Inicialmente, apresenta-se a definição de faixas de valores, adequada para a realidade do estudo de caso, para cada uma das subcategorias do método do gráfico de risco calibrado. Em seguida, conhecem-se os resultados de determinação do SIL requerido e os de análise de sensibilidade, ambos obtidos por meio dos modelos computacionais implementados.

5.1 CALIBRAÇÃO DO GRÁFICO DE RISCO

A Tabela 4 apresenta a “calibração” adotada para os parâmetros do gráfico de risco da Tabela 2 e Figura 4.

Tratando-se dos valores reais, o risco pessoal foi classificado como variando de 0 a 5. O início do intervalo corresponde à inexistência de lesões. Estas, por sua vez, vão de um valor imediatamente superior a 0 e inferior a 1, uma vez que a unidade representa a ocorrência da primeira morte. A faixa foi estendida até 5 por ter sido este considerado o número máximo de trabalhadores que, de uma forma geral, estão na área de risco. Ao risco ambiental, por ser mais difícil de quantificar (tanto em termos financeiros quanto de dano ao meio ambiente), foi atribuída uma faixa de variação de 0 a 5, uma graduação cuja evolução (correspondendo à gravidade) é de fácil assimilação. Por fim, o risco econômico engloba todas as variáveis abordadas no item 2.2.3 deste trabalho e foi adequado à realidade da empresa.

Os valores de ocupação humana foram definidos de um ponto de vista relativamente conservador, considerando-se que uma área ocupada durante pelo menos 30 % do tempo é uma área “frequentemente” ocupada.

Conforme descrito pela norma, o parâmetro P não pode ser entendido como uma faixa de variação: ou todas as condições são satisfeitas, caso de P_A, ou pelo menos uma não o é, caso de P_B. Para atribuir uma faixa de variação a este parâmetro, caberia uma alteração da norma, o que fugiria do escopo deste trabalho. Compreende-se que isto não seja feito ao se pressupor que a satisfação simultânea dos três critérios abordados é absolutamente necessária para evitar a ocorrência de um acidente.

Por fim, o intervalo de variação de W é o mesmo indicado pela norma IEC-61511.

Tabela 4: Faixas de valores adotadas na calibração do gráfico de risco.

PARÂMETRO DE RISCO	CATEGORIA	SUBCATEGORIA	FAIXA DE VALORES	FAIXA DE VALORES ESCALONADOS
C	C _A	C _{A1}	]0 ; 0,1]	]0 ; 0,02]
		C _{A2}	]0 ; 1]	]0 ; 0,2]
		C _{A3}	]R\$ 0,00 ; R\$ 10.000,00]	]0 ; 0,02]
	C _B	C _{B1}	]0,1 ; 1]	]0,02 ; 0,2]
		C _{B2}	]1 ; 2,5]	]0,2 ; 0,5]
		C _{B3}	]R\$ 10.000,00 ; R\$ 50.000,00]	]0,02 ; 0,1]
	C _C	C _{C1}	]1 ; 2]	]0,2 ; 0,4]
		C _{C2}	]2,5 ; 4]	]0,5 ; 0,8]
		C _{C3}	]R\$ 50.000,00 ; R\$ 100.000,00]	]0,1 ; 0,2]
	C _D	C _{D1}	]2 ; 5]	]0,4 ; 1]
		C _{D2}	]4 ; 5]	]0,8 ; 1]
		C _{D3}	]R\$ 100.000,00 ; R\$ 500.000,00]	]0,2 ; 1]
F	F _A		]0 ; 0,3]	]0 ; 0,3]
	F _B		]0,3 ; 1]	]0,3 ; 1]
P	P _A		1	1
	P _B		0	0
W	W ₁		]0 ; 0,1]	]0 ; 0,01]
	W ₂		]0,1 ; 1]	]0,01 ; 0,1]
	W ₃		]1 ; 10]	]0,1 ; 1]

5.2 DETERMINAÇÃO DO SIL REQUERIDO

A Tabela 5 sintetiza, de acordo com o estudo de caso, os valores atribuídos aos diferentes parâmetros de risco, bem como as correspondentes categorias e o SIL requerido. O modelo M1 de simulação encontra-se no Apêndice 2.

Tabela 5: Definição do SIL requerido para as FIS do I-07.

PARÂMETRO DE RISCO	FIS											
	I-07.1	I-07.2	I-07.3	I-07.4	I-07.1	I-07.2	I-07.3	I-07.4	I-07.1	I-07.2	I-07.3	I-07.4
	VALOR				CATEGORIA				SIL REQUERIDO			
C (risco pessoal)	2	2	0	4	C _C	C _C	C _A	C _D	2	2	SRS*	3
C (risco ambiental)	3	2	1	5								
C (risco econômico) (R\$)	75000	30000	5000	400000								
F	0,7	0,7	0,7	0,7	F _B	F _B	-	F _B				
P	1	1	1	1	P _A	P _A	-	P _A				
W	0,5	0,5	0,5	0,5	W ₂	W ₂	W ₂	W ₂				

* Sem requisitos de segurança.

A ocupação da área de risco foi sempre avaliada como 0,7 (e classificada como F_B) uma vez que os operadores de área possuem uma sala de trabalho próxima à coluna D-620 e que eles desenvolvem boa parte de suas atividades de campo nas proximidades da torre. Ainda, uma análise do Anexo 1 revela que, em caso de acidente, o impacto se estenderia por praticamente toda a área industrial propriamente dita. O Anexo 1 também mostra que estes efeitos não atingiriam regiões de prédios administrativos, portaria, refeitórios etc.

Adotou-se o parâmetro P_A para todas as FIS pois a coluna D-620 é protegida por outras barreiras, algumas das quais intervindo simultaneamente ao intertravamento. Estas barreiras englobam tanto proteções diretas, como válvulas de alívio de pressão, dispositivos de desvio para sistema de flare, opções de drenagem do sistema para tanques, alarmes de gás, bloqueio de vapor para refervedores, dentre outros, quanto ações indiretas, a exemplo das verificações locais de instrumentos, das inspeções de rotina realizadas por operadores e mantenedores, do monitoramento por câmeras, etc.

Observa-se na Tabela 5 que, para todas as FIS, a taxa de demanda é 0,5. Este valor foi estimado por funcionários da empresa e não é muito elevado pois a coluna D-620, sendo a última etapa de purificação do produto final, é um equipamento crítico no que tange à qualidade da produção da empresa. Assim sendo, sua instrumentação tem um rígido controle e confiabilidade relativamente elevada.

Uma vez que, conforme a Tabela 3, as I-07.1, I-07.2 e I-07.3 possuem diversos iniciadores agindo sobre um atuador comum, a classificação final para este atuador, quando da implementação de um SIS certificado, é a mais rigorosa dentre as três, SIL 2. O mesmo valeria para o executor de lógica caso este seja compartilhado para as três FIS. Na hipótese de

estas FIS terem algum componente em comum com a FIS I-07.4, este deverá ter sua classificação elevada para SIL 3.

Do exposto, nota-se que a definição dos valores (e, por consequência, do SIL) foi realizada com base em julgamentos e opiniões pessoais. Esta definição é tão melhor quanto mais pessoas participem da definição e quanto mais dados precisos (históricos, análises de risco, estudos específicos etc.) estiverem disponíveis. Neste contexto, a análise de sensibilidade surge como uma ferramenta pertinente para indicar a necessidade de se aperfeiçoar e de se detalhar a análise dos pontos que estiverem próximos às faixas de transição das categorias, bem como para se ter um panorama de quão distante se está de uma categoria de SIL imediatamente acima ou abaixo.

5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA DETERMINAÇÃO DO SIL

Com o objetivo de ilustrar a aplicação do modelo M2 para realização da análise de sensibilidade do valor do SIL anteriormente definido com relação a seus parâmetros determinantes, escolheu-se a FIS I-07.1 para exemplificação. Neste trabalho, a análise é realizada apenas para os parâmetros risco ambiental, risco econômico e taxa de demanda. Com efeito, nesta aplicação, neles reside a maior incerteza. Considera-se que o risco pessoal está bem definido, uma vez que se conhece o número de pessoas que em geral estão presentes na área de risco e que se admite a capacidade de prever o que poderia acontecer com elas em caso de acidente. O mesmo vale para o tempo de exposição e para a probabilidade de se evitar o evento perigoso. Estes três parâmetros serão, desta forma, mantidos constantes para a FIS e assumem os valores da Tabela 5. Cabe lembrar, entretanto, que o modelo M2 dá liberdade para se variar quaisquer parâmetros com exceção do parâmetro P (definido sempre de antemão como 0 ou 1).

5.3.1 SENSIBILIDADE AO RISCO AMBIENTAL

A Figura 8 mostra o comportamento do SIL da FIS I-07.1 quando se permite variar o risco ambiental, mantendo-se os outros parâmetros fixos. Em se tratando dos parâmetros associados, seu comportamento pode ser visualizado na Tabela 6.

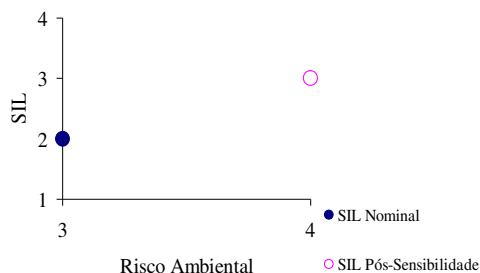


Figura 8: Comportamento esperado para o SIL quando se permite variar o risco ambiental para a FIS I-07.1.

Tabela 6: Comportamento dos parâmetros e do SIL quando se permite variar o risco ambiental associado à FIS I-07.1

	PARÂMETRO					
	C	F	P	X	W	SIL
Nominal	C_C	F_B	P_A	X_4	W_2	2
Pós- sensibilidade	C_D	F_B	P_A	X_5	W_2	3

A sensibilidade do risco ambiental até a mudança para uma faixa de SIL superior pode ser considerada relativamente pequena, uma vez que o valor inicial situava-se aproximadamente no meio de seu intervalo. Com base na Tabela 2, a diferença fundamental entre os dois valores reside na maior ou menor facilidade de resolução do evento ambiental. Para se ter um melhor posicionamento a respeito de tal aspecto, sugere-se a realização de treinamentos e simulados específicos para o fim ambiental, englobando, por exemplo, manobras remotas (via sala de controle), desvio de produto derramado para canaletas químicas, drenagem/bombeamento do produto derramado para uma bacia de emergência, espalhamento de areia ou outra substância absorvente sobre o conteúdo que vazou, etc. Uma vez feito isto, uma análise crítica dos resultados permitiria uma melhor definição do grau de dificuldade imposto pela situação.

5.3.2 SENSIBILIDADE AO RISCO ECONÔMICO

A Figura 9 mostra o comportamento do SIL da FIS I-07.1 quando se permite variar o risco econômico, mantendo-se os outros parâmetros fixos. Em se tratando dos parâmetros associados, seu comportamento pode ser visualizado na Tabela 7.

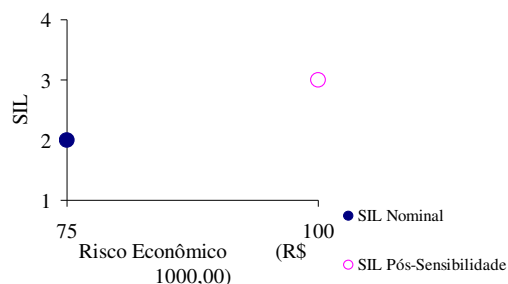


Figura 9: Comportamento esperado para o SIL quando se permite variar o risco econômico para a FIS I-07.1.

Tabela 7: Comportamento dos parâmetros e do SIL quando se permite variar o risco econômico associado à FIS I-07.1

	PARÂMETRO					
	C	F	P	X	W	SIL
Nominal	C_C	F_B	P_A	X_4	W_2	2
Pós- sensibilidade	C_D	F_B	P_A	X_5	W_2	3

A sensibilidade do risco econômico na mudança para uma faixa de SIL superior é consideravelmente elevada (variação de apenas R\$ 25.000,00). Portanto, é importante que se aprimorem as análises de todos os equipamentos e instrumentos que poderiam ser destruídos e que se conheçam seus valores atuais. Além disso, é de suma importância que sejam estimadas as perdas ligadas à parada de produção, os custos de reparos e reinstalações, a fragilização da imagem da empresa, dentre outros.

5.3.3 SENSIBILIDADE À TAXA DE DEMANDA

A Figura 10 mostra o comportamento do SIL da FIS I-07.1 quando se permite variar a taxa de demanda, mantendo-se os outros parâmetros fixos. Em se tratando dos parâmetros associados, seu comportamento pode ser visualizado na Tabela 8.

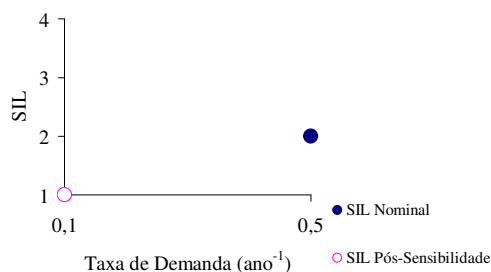


Figura 10: Comportamento esperado para o SIL quando se permite variar a taxa de demanda para a FIS I-07.1.

Tabela 8: Comportamento dos parâmetros e do SIL quando se permite variar a taxa de demanda associada à FIS I-07.1

	PARÂMETRO					SIL
	C	F	P	X	W	
Nominal	C _C	F _B	P _A	X ₄	W ₂	2
Pós- sensibilidade	C _C	F _B	P _A	X ₄	W ₁	1

A existência de um histórico confiável de incidentes no sistema seria de grande valor, fosse este relacionado a acionamentos da FIS I-07.1 ou a outros instrumentos na coluna. Ele permitiria estimar com maior convicção o parâmetro W, que é de elevada sensibilidade. Neste estudo de caso, embora sua menor variação se dê para uma faixa de SIL inferior, se a taxa de demanda inicial tivesse sido considerada $0,6 \text{ ano}^{-1}$ e não $0,5 \text{ ano}^{-1}$ (uma diferença tênue para se estimar baseando-se apenas em lembranças pessoais), o SIL aumentaria.

5.3.4 SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO CONJUNTA RISCO AMBIENTAL-TAXA DE DEMANDA E RISCO ECONÔMICO-TAXA DE DEMANDA

Para a FIS I-07.1, quando se permitem variar simultaneamente o risco ambiental e a taxa de demanda ou o risco econômico e a taxa de demanda, o modelo dá como resposta uma variação na taxa de demanda, mantendo o outro parâmetro constante. Isto corresponde à situação representada na Figura 10 e na Tabela 8 e ocorre pois a faixa de variação de W, quando na ordem de grandeza dos valores desta aplicação, é menor que a dos outros parâmetros. Assim sendo, W é o parâmetro mais sensível (crítico) nesta simulação.

5.3.5 SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO CONJUNTA RISCO AMBIENTAL-RISCO ECONÔMICO

Para a FIS I-07.1, ao se variarem o risco ambiental e o risco econômico juntos, o SIL aumenta para 3 com um aumento do risco econômico, conforme a situação mostrada na Figura 9 e na Tabela 7. Nesta simulação, logo, o SIL é mais sensível ao risco econômico.

5.3.6 SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO CONJUNTA DO RISCO AMBIENTAL, RISCO ECONÔMICO E TAXA DE DEMANDA

Para a FIS I.07-1, apesar de os três parâmetros poderem variar, a menor variação ocorre para a taxa de demanda, ficando os outros dois parâmetros constantes. Esta situação está ilustrada nas Figura 10 e na Tabela 8. Verifica-se novamente que, para este estudo de caso, numa análise conjunta de todos de parâmetros, W é o parâmetro de entrada de maior sensibilidade no resultado final (SIL).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O emprego de normas e procedimentos padrões em decisões de Engenharia é uma prática comum de reconhecida utilidade e confiabilidade. Em se tratando especificamente de Segurança de Processo, uma área relativamente recente no que tange a normas, as principais normas internacionais existentes configuram-se como referências incontestáveis para a credibilização de trabalhos. No que diz respeito ao SIL, entretanto, por trás da aparente simplicidade no uso e na implementação de metodologias como o gráfico de risco calibrado, existe a possibilidade de obtenção de resultados inconsistentes, conservadores ou subestimados, que podem levar a definições imprecisas de SIL.

A utilização de definições qualitativas para parâmetros de risco é bastante subjetiva. De fato, seus significados podem ser mal interpretados. Em face disto, deve-se idealmente dispor de informações vastas e completas sobre os tópicos abordados. Para uma análise ainda mais criteriosa, uma solução coerente é a quantificação destes parâmetros. Neste trabalho, foi proposta uma calibração para o gráfico de risco apresentado pela norma IEC-61511 tendo em vista uma situação real encontrada em uma das unidades industriais da empresa Oxiteno. Foram assim sugeridas quantificações para os parâmetros risco pessoal, risco ambiental, risco econômico, ocupação humana da área de risco, probabilidade de se evitar o evento perigoso e taxa de demanda do sistema instrumentado de segurança. Pôde-se, desta forma, avaliar, sob diversos pontos de vista, os impactos de uma falha no sistema de segurança de uma coluna de destilação de metil-etil-cetona.

O primeiro modelo computacional criado neste trabalho permitiu a definição do SIL requerido para cada uma das quatro funções instrumentadas de segurança do sistema instrumentado de segurança da coluna de destilação. A partir do estudo de caso, determinou-se que uma FIS não apresenta requisitos de segurança, duas FIS requerem SIL 2 e uma SIL 3.

O segundo modelo computacional implementado possibilitou a realização de uma análise de sensibilidade de valores de entrada no valor do SIL requerido para uma das FIS de SIL 2. Esta revelou uma baixa sensibilidade com relação ao parâmetro risco ambiental e elevada sensibilidade dos parâmetros risco econômico e, em especial, taxa de demanda. Os dois primeiros estão mais propensos à elevação da faixa de SIL, ao passo que o último à sua redução. De posse destas informações, foram propostas medidas para aprofundamento e aperfeiçoamento das análises realizadas, incluindo, por exemplo, a realização de treinamentos operacionais específicos, o detalhamento das análises de impacto econômico e a criação de um histórico de incidentes no sistema.

A aplicação do modelo de análise de sensibilidade pode indicar o caminho para a obtenção de um SIS com menor SIL requerido. Frisa-se, contudo, que o objetivo do modelo não é reduzir o valor de SIL, mas sim servir de instrumento de análise e interpretação de dados. Assim, deve-se sempre considerar o risco máximo tolerável pela empresa.

O otimizador GAMS[®] mostrou-se adequado para a implementação de ambos os modelos. Também foi adequada a estratégia de criação de um problema de otimização do tipo MILP para o modelo de análise de sensibilidade.

Ao se compararem os resultados dos modelos criados com aqueles que seriam obtidos através da aplicação “convencional” do método do gráfico de risco calibrado, conforme descrito na IEC-61511, constata-se a adequação dos modelos para a predição do SIL requerido e para a realização de análises de sensibilidade dos parâmetros de entrada no resultado final. Este fato comprova a utilidade e a conveniência da utilização destes modelos, que se tornam, de agora em diante, uma metodologia genérica, sistemática e computacional para a realização das aplicações supramencionadas.

Como possíveis continuações para o trabalho aqui apresentado, sugerem-se:

- a extensão do modelo de análise de sensibilidade às outras FIS ou a outros sistemas;
- o refinamento da calibração do gráfico de risco e da quantificação dos impactos da falha no SIS;
- uma análise do custo real da implementação de malhas com certificação SIL;
- uma verificação, através do cálculo da probabilidade de falha na demanda, do SIL efetivamente instalado no sistema atual;
- a implementação de modelos de análise de sensibilidade com funções objetivos diferentes da aqui utilizada, como por exemplo a minimização do quadrado dos módulos, e a posterior comparação com os resultados do modelo atual.

BIBLIOGRAFIA

I ENCONTRO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA E ANÁLISE DE RISCOS EM, INDÚSTRIAS QUÍMICAS E PETROQUÍMICAS. 17 a 21 de agosto de 1987. Salvador: organizado pela ABGR e UFBA. p.1.1, 2.4-2.6, 3.0, 4.2-4.4.

CASAL, J. *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants*. v. 8. Amsterdam: Elsevier B.V, 2008. p.12.

CHAME, L.M. *Confiabilidade de sistemas instrumentados de segurança: análise custo-benefício de alternativas para o atendimento ao SIL requerido em instalações industriais*. 2007. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GREENBERG, H.R, CRAMER, J.J. *Risk assessment and risk management for the chemical process industry process safety analysis: an introduction*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1991. p.ix.

HUMAN ERROR – SYSTEMIC MODEL. Federal Aviation Administration. Acesso em 20 de setembro de 2010. Disponível em <http://www.hf.faa.gov/webtraining/teamperform/TeamCRM009.htm>.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Safety instrumented systems for the process industry sector: Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels*, IEC-61511-3. Genebra, 2003. p.67-83.

MARSHAL, V., RUHEMANN, S. *Fundamentals of process safety*. Rugby: Institution of Chemical Engineers, 2001. p.8-11.

O QUE É UM SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURANÇA?. Process Safety Beacon, CCPS. Jul. 2009. Acesso em 20 de setembro de 2010. Disponível em <http://www.aiche.org/uploadedFiles/CCPS/Resources/Beacon/July09EnglishBeacon.pdf>.

PALLUZI, R.P. *Pilot plant and laboratory safety*. USA: McGraw-Hill, 1994. p.64-65, 83.

RAMAN, R., GROSSMAN, I. E. *Relation between MILP modelling and logical inference for chemical process synthesis*. Computers chem.. Engn, v. 15, n. 2, p.73-84, 1991.

REASON, J. *The human contribution: unsafe acts, accidents and heroic recoveries*. Ashgate: Ashgate Publishing, 2008. p.101.

ROLAND, H.E., MORIARTY, B. *System safety engineering and management*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1990. p.4

SAKAMOTO, EDISON; NUNES, RAQUEL TONETO. Safety ou security: qual a diferença?. **InTech**, São Paulo: n.122, p.10-14. 2010.

SKELTON, B. *Process safety analysis: an introduction*. Rugby: Institution of Chemical Engineers, 1997. p.1-2.

APÊNDICE 1

▪ MODELO M1 PARA DETERMINAÇÃO DO SIL REQUERIDO

1) CONDIÇÕES DE EXCLUSIVIDADE

$$\begin{aligned} \sum_{i=A}^D y_{Ci} &= 1, y_{Ci} \in \{0,1\} \\ \sum_{i=A}^B y_{Fi} &= 1, y_{Fi} \in \{0,1\} \\ \sum_{i=A}^B y_{Pi} &= 1, y_{Pi} \in \{0,1\} \\ \sum_{i=1}^3 y_{Wi} &= 1, y_{Wi} \in \{0,1\} \\ \sum_{i=1}^6 y_{Xi} &= 1, y_{Xi} \in \{0,1\} \end{aligned}$$

2) FORMULAÇÕES PARA OBTENÇÃO DE X_i (baseadas nas relações genéricas a seguir)

$\begin{aligned} A &\Rightarrow B \\ \neg A &\vee B \\ (1 - A) + B &\geq 1 \\ A &\leq B \end{aligned}$	$\begin{aligned} A \wedge B \wedge C &\Rightarrow D \\ \neg (A \wedge B \wedge C) &\vee D \\ \neg A \vee \neg B \vee \neg C &\vee D \\ (1 - A) + (1 - B) + (1 - C) + D &\geq 1 \\ A + B + C &\leq D + 2 \end{aligned}$
--	--

SENTENÇA LÓGICA	INEQUAÇÃO LINEAR
$y_{CA} \Rightarrow y_{X1}$	$y_{CA} \leq y_{X1}$
$y_{CB} \wedge y_{FA} \wedge y_{PA} \Rightarrow y_{X2}$	$y_{CB} + y_{FA} + y_{PA} \leq y_{X2} + 2$
$y_{CB} \wedge y_{FA} \wedge y_{PB} \Rightarrow y_{X3}$	$y_{CB} + y_{FA} + y_{PB} \leq y_{X3} + 2$
$y_{CB} \wedge y_{FB} \wedge y_{PA} \Rightarrow y_{X3}$	$y_{CB} + y_{FB} + y_{PA} \leq y_{X3} + 2$
$y_{CB} \wedge y_{FB} \wedge y_{PB} \Rightarrow y_{X4}$	$y_{CB} + y_{FB} + y_{PB} \leq y_{X4} + 2$
$y_{CC} \wedge y_{FA} \wedge y_{PA} \Rightarrow y_{X3}$	$y_{CC} + y_{FA} + y_{PA} \leq y_{X3} + 2$
$y_{CC} \wedge y_{FA} \wedge y_{PB} \Rightarrow y_{X4}$	$y_{CC} + y_{FA} + y_{PB} \leq y_{X4} + 2$
$y_{CC} \wedge y_{FB} \wedge y_{PA} \Rightarrow y_{X4}$	$y_{CC} + y_{FB} + y_{PA} \leq y_{X4} + 2$
$y_{CC} \wedge y_{FB} \wedge y_{PB} \Rightarrow y_{X5}$	$y_{CC} + y_{FB} + y_{PB} \leq y_{X5} + 2$
$y_{CD} \wedge y_{FA} \wedge y_{PA} \Rightarrow y_{X4}$	$y_{CD} + y_{FA} + y_{PA} \leq y_{X4} + 2$
$y_{CD} \wedge y_{FA} \wedge y_{PB} \Rightarrow y_{X5}$	$y_{CD} + y_{FA} + y_{PB} \leq y_{X5} + 2$
$y_{CD} \wedge y_{FB} \wedge y_{PA} \Rightarrow y_{X5}$	$y_{CD} + y_{FB} + y_{PA} \leq y_{X5} + 2$
$y_{CD} \wedge y_{FB} \wedge y_{PB} \Rightarrow y_{X6}$	$y_{CD} + y_{FB} + y_{PB} \leq y_{X6} + 2$

3) FORMULAÇÕES PARA OBTENÇÃO DO SIL

$$y_{S1} = -1 \text{ (---)} \quad y_{S2} = \varepsilon \text{ (a)} \quad y_{S3} = 1 \text{ (SIL 1)}$$

$$y_{S4} = 2 \text{ (SIL 2)} \quad y_{S5} = 3 \text{ (SIL 3)} \quad y_{S6} = 4 \text{ (SIL 4)} \quad y_{S7} = 5 \text{ (b)}$$

4) CONDIÇÃO DE EXCLUSIVIDADE : $\sum_{i=1}^7 y_{Si} = 1$, $y_{Si} \in \{0,1\}$

5)

$$A \wedge B \Rightarrow C$$

$$\neg (A \wedge B) \vee C$$

$$\neg A \vee \neg B \vee C$$

$$(1 - A) + (1 - B) + D \geq 1$$

$$A + B \leq D + 1$$

SENTENÇA LÓGICA	SENTENÇA LÓGICA REDUZIDA	INEQUAÇÃO LINEAR
$y_{X1} \wedge y_{W3} \Rightarrow y_{S2}$	$y_{X1} \wedge y_{Wi+1} \Rightarrow y_{Si}$	$y_{X1} + y_{Wi+1} \leq y_{Si} + 1$
$y_{X1} \wedge y_{W2} \Rightarrow y_{S1}$		
$y_{X1} \wedge y_{W1} \Rightarrow y_{S1}$		
$y_{X2} \wedge y_{W3} \Rightarrow y_{S3}$	$y_{X2} \wedge y_{Wi} \Rightarrow y_{Si}$	$y_{X2} + y_{Wi} \leq y_{Si} + 1$
$y_{X2} \wedge y_{W2} \Rightarrow y_{S2}$		
$y_{X2} \wedge y_{W1} \Rightarrow y_{S1}$		
$y_{X3} \wedge y_{W3} \Rightarrow y_{S4}$	$y_{X3} \wedge y_{Wi-1} \Rightarrow y_{Si}$	$y_{X3} + y_{Wi-1} \leq y_{Si} + 1$
$y_{X3} \wedge y_{W2} \Rightarrow y_{S3}$		
$y_{X3} \wedge y_{W1} \Rightarrow y_{S2}$		
$y_{X4} \wedge y_{W3} \Rightarrow y_{S5}$	$y_{X4} \wedge y_{Wi-2} \Rightarrow y_{Si}$	$y_{X4} + y_{Wi-2} \leq y_{Si} + 1$
$y_{X4} \wedge y_{W2} \Rightarrow y_{S4}$		
$y_{X4} \wedge y_{W1} \Rightarrow y_{S3}$		
$y_{X5} \wedge y_{W3} \Rightarrow y_{S6}$	$y_{X5} \wedge y_{Wi-3} \Rightarrow y_{Si}$	$y_{X5} + y_{Wi-3} \leq y_{Si} + 1$
$y_{X5} \wedge y_{W2} \Rightarrow y_{S5}$		
$y_{X5} \wedge y_{W1} \Rightarrow y_{S4}$		
$y_{X6} \wedge y_{W3} \Rightarrow y_{S7}$	$y_{X6} \wedge y_{Wi-4} \Rightarrow y_{Si}$	$y_{X6} + y_{Wi-4} \leq y_{Si} + 1$
$y_{X6} \wedge y_{W2} \Rightarrow y_{S6}$		
$y_{X6} \wedge y_{W1} \Rightarrow y_{S5}$		

6) $y_{SIL} = -1 \times y_{S1} + \varepsilon \times y_{S2} + 1 \times y_{S3} + 2 \times y_{S4} + 3 \times y_{S5} + 4 \times y_{S6} + 5 \times y_{S7}$

7) FORMULAÇÕES PARA Cij

CONDIÇÃO DE EXCLUSIVIDADE: $\sum_{i=A}^D y_{cij} = 1, j \in \{1, 2, 3\}, y_{cij} \in \{0, 1\}$

1.

$$\begin{aligned} & \bigvee_{i=D, j=1}^{j=3} \Rightarrow y_{CD} \\ & y_{CD1} \vee y_{CD2} \vee y_{CD3} \Rightarrow y_{CD} \\ & \neg (y_{CD1} \vee y_{CD2} \vee y_{CD3}) \vee y_{CD} \\ & (\neg y_{CD1} \wedge \neg y_{CD2} \wedge \neg y_{CD3}) \vee y_{CD} \\ & (\neg y_{CD1} \vee y_{CD}) \wedge (\neg y_{CD2} \vee y_{CD}) \wedge (\neg y_{CD3} \vee y_{CD}) \end{aligned}$$

$$(1 - y_{CD1}) + y_{CD} \geq 1$$

$$(1 - y_{CD2}) + y_{CD} \geq 1$$

$$(1 - y_{CD3}) + y_{CD} \geq 1$$

$$y_{CD1} \leq y_{CD}$$

$$y_{CD2} \leq y_{CD}$$

$$y_{CD3} \leq y_{CD}$$

$$y_{CDj} \leq y_{CD}$$

2.

$$\begin{aligned} & (\bigvee_{i=C, j=1}^{j=3} \wedge \neg y_{CD}) \Rightarrow y_{CC} \\ & (y_{CC1} \vee y_{CC2} \vee y_{CC3}) \wedge \neg y_{CD} \Rightarrow y_{CC} \\ & \neg [(y_{CC1} \vee y_{CC2} \vee y_{CC3}) \vee y_{CD}] \vee y_{CC} \\ & [(\neg y_{CC1} \wedge \neg y_{CC2} \wedge \neg y_{CC3}) \vee y_{CD}] \vee y_{CC} \\ & [(\neg y_{CC1} \vee y_{CD}) \wedge (\neg y_{CC2} \vee y_{CD}) \wedge (\neg y_{CC3} \vee y_{CD})] \vee y_{CC} \\ & [(\neg y_{CC1} \vee y_{CD}) \vee y_{CC}] \wedge [(\neg y_{CC2} \vee y_{CD}) \vee y_{CC}] \wedge [(\neg y_{CC3} \vee y_{CD}) \vee y_{CC}] \\ & (\neg y_{CC1} \vee y_{CD} \vee y_{CC}) \wedge (\neg y_{CC2} \vee y_{CD} \vee y_{CC}) \wedge (\neg y_{CC3} \vee y_{CD} \vee y_{CC}) \end{aligned}$$

$$(1 - y_{CC1}) + y_{CD} + y_{CC} \geq 1$$

$$(1 - y_{CC2}) + y_{CD} + y_{CC} \geq 1$$

$$(1 - y_{CC3}) + y_{CD} + y_{CC} \geq 1$$

$$y_{CC1} \leq y_{CD} + y_{CC}$$

$$y_{CC2} \leq y_{CD} + y_{CC}$$

$$y_{CC3} \leq y_{CD} + y_{CC}$$

$$y_{CCj} \leq y_{CD} + y_{CC}$$

3.

$$\begin{aligned}
& (\bigvee_{i=B, j=1}^{j=3} \neg y_{CD} \wedge \neg y_{CC}) \Rightarrow y_{CB} \\
& (y_{CB1} \vee y_{CB2} \vee y_{CB3}) \wedge \neg y_{CD} \wedge \neg y_{CC} \Rightarrow y_{CB} \\
& \neg [(y_{CB1} \vee y_{CB2} \vee y_{CB3}) \vee y_{CD} \vee y_{CC}] \vee y_{CB} \\
& [(\neg y_{CB1} \wedge \neg y_{CB2} \wedge \neg y_{CB3}) \vee y_{CD} \vee y_{CC}] \vee y_{CB} \\
& [(\neg y_{CB1} \vee y_{CD} \vee y_{CC}) \wedge (\neg y_{CB2} \vee y_{CD} \vee y_{CC}) \wedge (\neg y_{CB3} \vee y_{CD} \vee y_{CC})] \vee y_{CB} \\
& [(\neg y_{CB1} \vee y_{CD} \vee y_{CC}) \vee y_{CB}] \wedge [(\neg y_{CB2} \vee y_{CD} \vee y_{CC}) \vee y_{CB}] \wedge [(\neg y_{CB3} \vee y_{CD} \vee y_{CC}) \vee y_{CB}] \\
& (\neg y_{CB1} \vee y_{CD} \vee y_{CC} \vee y_{CB}) \wedge (\neg y_{CB2} \vee y_{CD} \vee y_{CC} \vee y_{CB}) \wedge (\neg y_{CB3} \vee y_{CD} \vee y_{CC} \vee y_{CB})
\end{aligned}$$

$$(1 - y_{CB1}) + y_{CD} + y_{CC} + y_{CB} \geq 1$$

$$(1 - y_{CB2}) + y_{CD} + y_{CC} + y_{CB} \geq 1$$

$$(1 - y_{CB3}) + y_{CD} + y_{CC} + y_{CB} \geq 1$$

$$y_{CB1} \leq y_{CD} + y_{CC} + y_{CB}$$

$$y_{CB2} \leq y_{CD} + y_{CC} + y_{CB}$$

$$y_{CB3} \leq y_{CD} + y_{CC} + y_{CB}$$

$$y_{CBj} \leq y_{CD} + y_{CC} + y_{CB}$$

8) FORMULAÇÕES INVERSAS PARA Cij

1.

$$\begin{aligned}
& y_{CD} \Rightarrow \bigvee_{i=D, j=1}^{j=3} \\
& y_{CD} \Rightarrow y_{CD1} \vee y_{CD2} \vee y_{CD3} \\
& \neg y_{CD} \vee (y_{CD1} \vee y_{CD2} \vee y_{CD3})
\end{aligned}$$

$$(1 - y_{CD}) + y_{CD1} + y_{CD2} + y_{CD3} \geq 1$$

$$y_{CD} \leq y_{CD1} + y_{CD2} + y_{CD3}$$

2.

$$\begin{aligned}
& y_{CC} \Rightarrow \bigvee_{i=C, j=1}^{j=3} \wedge \neg y_{CD} \\
& y_{CC} \Rightarrow (y_{CC1} \vee y_{CC2} \vee y_{CC3}) \wedge \neg y_{CD} \\
& \neg y_{CC} \vee (y_{CC1} \vee y_{CC2} \vee y_{CC3} \wedge \neg y_{CD}) \\
& (\neg y_{CC} \vee y_{CC1}) \vee (\neg y_{CC} \vee y_{CC2}) \vee (\neg y_{CC} \vee y_{CC3}) \wedge (\neg y_{CC} \vee \neg y_{CD})
\end{aligned}$$

$$(1 - y_{CC}) + y_{CC1} + (1 - y_{CC}) + y_{CC2} + (1 - y_{CC}) + y_{CC3} \geq 1$$

$$(1 - y_{CC}) + (1 - y_{CD}) \geq 1$$

$$3y_{CC} \leq 2 + y_{CC1} + y_{CC2} + y_{CC3}$$

$$y_{CC} + y_{CD} \leq 1$$

3.

$$\begin{aligned} y_{CB} &\Rightarrow (\bigvee_{i=B,j=1}^{j=3} \wedge \neg y_{CD} \wedge \neg y_{CC}) \\ y_{CB} &\Rightarrow (y_{CB1} \vee y_{CB2} \vee y_{CB3}) \wedge \neg y_{CD} \wedge \neg y_{CC} \\ &\neg y_{CB} \vee [(y_{CB1} \vee y_{CB2} \vee y_{CB3}) \wedge \neg y_{CD} \wedge \neg y_{CC}] \\ &(\neg y_{CB} \vee y_{CB1}) \vee (\neg y_{CB} \vee y_{CB2}) \vee (\neg y_{CB} \vee y_{CB3}) \wedge (\neg y_{CB} \vee \neg y_{CD}) \wedge (\neg y_{CB} \vee \neg y_{CC}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1 - y_{CB}) + y_{CB1} + (1 - y_{CB}) + y_{CB2} + (1 - y_{CB}) + y_{CB3} &\geq 1 \\ (1 - y_{CB}) + (1 - y_{CD}) &\geq 1 \\ (1 - y_{CB}) + (1 - y_{CC}) &\geq 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3y_{CB} &\leq 2 + y_{CB1} + y_{CB2} + y_{CB3} \\ y_{CB} + y_{CD} &\leq 1 \\ y_{CB} + y_{CC} &\leq 1 \end{aligned}$$

9) DISJUNÇÕES PARA ASSOCIAÇÃO FAIXAS DE VALORES-VARIÁVEIS BINÁRIAS

$$\left[\begin{array}{c} y_{CA1} \\ a \leq x \leq b \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{CB1} \\ b \leq x \leq c \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{CC1} \\ c \leq x \leq d \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{CD1} \\ d \leq x \leq e \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} ay_{CA1} &\leq x \leq by_{CA1} \\ by_{CB1} &\leq x \leq cy_{CB1} \\ cy_{CC1} &\leq x \leq dy_{CC1} \\ dy_{CD1} &\leq x \leq ey_{CD1} \\ y_{CA1} + y_{CB1} + y_{CC1} + y_{CD1} &= 1 \end{aligned}$$

$$\left[\begin{array}{c} y_{CA2} \\ a \leq r \leq b \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{CB2} \\ b \leq r \leq c \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{CC2} \\ c \leq r \leq d \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{CD2} \\ d \leq r \leq e \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} ay_{CA2} &\leq r \leq by_{CA2} \\ by_{CB2} &\leq r \leq cy_{CB2} \\ cy_{CC2} &\leq r \leq dy_{CC2} \\ dy_{CD2} &\leq r \leq ey_{CD2} \\ y_{CA2} + y_{CB2} + y_{CC2} + y_{CD2} &= 1 \end{aligned}$$

$$\left[\begin{array}{c} y_{CA3} \\ a \leq s \leq b \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{CB3} \\ b \leq s \leq c \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{CC3} \\ c \leq s \leq d \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{CD3} \\ d \leq s \leq e \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} ay_{CA3} &\leq s \leq by_{CA3} \\ by_{CB3} &\leq s \leq cy_{CB3} \\ cy_{CC3} &\leq s \leq dy_{CC3} \\ dy_{CD3} &\leq s \leq ey_{CD3} \\ y_{CA3} + y_{CB3} + y_{CC3} + y_{CD3} &= 1 \end{aligned}$$

$$\left[\begin{array}{c} y_{FA} \\ a \leq w \leq b \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{FB} \\ b \leq w \leq c \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} ay_{FA} &\leq w \leq by_{FA} \\ by_{FB} &\leq w \leq cy_{FB} \\ y_{FA} + y_{FB} &= 1 \end{aligned}$$

$$\left[\begin{array}{c} y_{W1} \\ a \leq o \leq b \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{W2} \\ b \leq o \leq c \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} y_{W3} \\ b \leq o \leq c \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} ay_{W1} &\leq o \leq by_{W1} \\ by_{W2} &\leq o \leq cy_{W2} \\ cy_{W3} &\leq o \leq dy_{W3} \\ y_{W1} + y_{W2} + y_{W3} &= 1 \end{aligned}$$

▪ **MODELO M2 PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE**

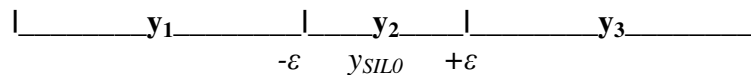
$$10) \left\{ \min \sum_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} |x_k - x_N| \quad \text{s.a. Eqs. M1 e } y_{SIL} \neq y_{SIL0} \right\}$$

$$11) \min \sum_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} m_k \quad \text{s.a. Eqs. M1}$$

$$-m_k \leq x_k - x_0 \leq m_k$$

$$m_k \geq 0; k = 1, \dots, p$$

12) DISJUNÇÃO



$$\left[-1 \leq \overset{y_1}{y_{SIL} - y_{SIL0}} \leq -\varepsilon \right] \vee \left[-\varepsilon \leq \overset{y_2}{y_{SIL} - y_{SIL0}} \leq \varepsilon \right] \vee \left[\varepsilon \leq \overset{y_3}{y_{SIL} - y_{SIL0}} \leq 5 \right]$$

$$y_{SIL} \leq y_{SIL0} - \varepsilon + M(1 - y_1)$$

$$y_{SIL} + M(1 - y_3) \geq y_{SIL0} + \varepsilon$$

$$y_{SIL} \leq y_{SIL0} + \varepsilon + M(1 - y_2)$$

$$y_{SIL} + M(1 - y_2) \geq y_{SIL0} - \varepsilon$$

13) RESTRIÇÃO

$$y_1 + y_2 + y_3 = 0$$

$$y_2 = 0 \text{ (para } SIL \neq SIL_0)$$

APÊNDICE 2

MODELOS COMPUTACIONAIS IMPLEMENTADOS EM GAMS

*==MODELO PARA DETERMINACAO DO SIL REQUERIDO==

Sets i1 indices p C /A,B,C,D/

i2 indices p F /A,B/

i3 indices p P /A,B/

ix indices p x /1*6/

iw indices p W /1*3/

is /1*7/

j /1,2,3/;

Positive Variable x risco pessoal (Faixa C)

r risco ambiental (Faixa C)

s risco economico (Faixa C)

o ocupacao humana (Faixa F)

u taxa de demanda (Faixa P);

Variables z,ysil;

Binary Variables yc(i1) xxxx

yf(i2) xxxx

yp(i3)

yx(ix)

yw(iw)

ys(is)

ycx(i1,j);

Parameter xo,ro,so,oo,uo;

*-----Definindo as Entradas: {C,F,P,U}-----

* Faixa Cj=1

xo=0.4;

* Faixa Cj=2

ro=0.6;

* Faixa Cj=3

so=0.15;

* Faixa F

oo=0.7;

* Valor de P

yp.fx('A')=1;

* Faixa U

uo=0.5;

*-----Faixas de variacao (valores escalonados)-----

* Faixa de risco pessoal (Cj=1):

Parameter a1,b1,c1,d1,e1a,ep;

a1=0;b1=0.02;c1=0.2;d1=0.4;e1a=1;

* Faixa de risco ambiental (Cj=2):

Parameter a2,b2,c2,d2,e2a;

a2=0;b2=0.2;c2=0.5;d2=0.8;e2a=1;

* Faixa de risco economico (Cj=3):

Parameter a3,b3,c3,d3,e3a;

a3=0;b3=0.02;c3=0.1;d3=0.2;e3a=1;

* Faixa de ocupacao humana (F):

Parameter a4,b4,c4;

a4=0;b4=0.3;c4=1;

* Faixa de taxa de demanda (U):

Parameter a6,b6,c6,d6;

a6=0;b6=0.01;c6=0.1;d6=1;

ep=0.001;

*-----Assinando as variaveis-----

x.fx=xo;

r.fx=ro;

s.fx=so;

o.fx=oo;

u.fx=uo;

*-----Equacoes 1-----

Positive Variable x1,x2,x3,x4;

Positive Variable r1,r2,r3,r4;

Positive Variable s1,s2,s3,s4;

Positive Variable o1,o2;

Positive Variable u1,u2,u3;

* Associando a faixa de risco pessoal (Cj=1):

Equation f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7,f8,f9;

f1.. x1=l=b1*ycx('A','1');

f2.. x1=g=a1*ycx('A','1');

f3.. x2=l=c1*ycx('B','1');

f4.. x2=g=(b1+ep)*ycx('B','1');

f5.. x3=l=d1*ycx('C','1');

f6.. x3=g=(c1+ep)*ycx('C','1');

f7.. x4=l=e1a*ycx('D','1');

f8.. x4=g=(d1+ep)*ycx('D','1');

f9.. x=e=x1+x2+x3+x4;

* Associando a faixa de risco ambiental (Cj=2):

Equation f1s,f2s,f3s,f4s,f5s,f6s,f7s,f8s,f9s;

f1s.. r1=l=b2*ycx('A','2');

f2s.. r1=g=a2*ycx('A','2');

f3s.. r2=l=c2*ycx('B','2');

f4s.. r2=g=(b2+ep)*ycx('B','2');

f5s.. r3=l=d2*ycx('C','2');

f6s.. r3=g=(c2+ep)*ycx('C','2');

f7s.. r4=l=e2a*ycx('D','2');

f8s.. r4=g=(d2+ep)*ycx('D','2');

f9s.. r=e=r1+r2+r3+r4;

* Associando a faixa de risco economico (Cj=3):

Equation f1a,f2a,f3a,f4a,f5a,f6a,f7a,f8a,f9a;

f1a.. s1=l=b3*ycx('A','3');

f2a.. s1=g=a3*ycx('A','3');

f3a.. s2=l=c3*ycx('B','3');

f4a.. s2=g=(b3+ep)*ycx('B','3');

f5a.. s3=l=d3*ycx('C','3');

f6a.. s3=g=(c3+ep)*ycx('C','3');

f7a.. s4=l=e3a*ycx('D','3');
f8a.. s4=g=(d3+ep)*ycx('D','3');

f9a.. s=e=s1+s2+s3+s4;

* Associando a faixa ocupacao humano (F):
Equation f1o,f2o,f3o,f4o,f5o;

f1o.. o1=l=b4*yf('A');
f2o.. o1=g=a4*yf('A');

f3o.. o2=l=c4*yf('B');
f4o.. o2=g=(b4+ep)*yf('B');

f5o.. o=e=o1+o2;

* Associando a faixa de taxa de demanda (U):
Equation f1u,f2u,f3u,f4u,f5u,f6u,f7u;

f1u.. u1=l=b6*yw('1');
f2u.. u1=g=a6*yw('1');

f3u.. u2=l=c6*yw('2');
f4u.. u2=g=(b6+ep)*yw('2');

f5u.. u3=l=d6*yw('3');
f6u.. u3=g=(c6+ep)*yw('3');

f7u.. u=e=u1+u2+u3;

*-----Equacoes 2-----

Equations e0,e1,e2,e3,e4,e5;

e0.. z=e=0;

* Condiçoes de exclusividade:

e1.. sum(i1, yc(i1)) =e= 1;
e2.. sum(i2, yf(i2)) =e= 1;
e3.. sum(i3, yp(i3)) =e= 1;
e4.. sum(ix, yx(ix)) =e= 1;
e5.. sum(iw, yw(iw)) =e= 1;

* Prosseguindo no grafico de risco:

Equations e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,e14,e15,e16,e17,e18;

e6.. yc('A')=l=yx('1');

e7.. yc('B')+yf('A')+yp('A')=l=yx('2')+2;
e8.. yc('B')+yf('A')+yp('B')=l=yx('3')+2;
e9.. yc('B')+yf('B')+yp('A')=l=yx('3')+2;
e10.. yc('B')+yf('B')+yp('B')=l=yx('4')+2;

e11.. yc('C')+yf('A')+yp('A')=l=yx('3')+2;
e12.. yc('C')+yf('A')+yp('B')=l=yx('4')+2;
e13.. yc('C')+yf('B')+yp('A')=l=yx('4')+2;
e14.. yc('C')+yf('B')+yp('B')=l=yx('5')+2;

e15.. yc('D')+yf('A')+yp('A')=l=yx('4')+2;
e16.. yc('D')+yf('A')+yp('B')=l=yx('5')+2;
e17.. yc('D')+yf('B')+yp('A')=l=yx('5')+2;
e18.. yc('D')+yf('B')+yp('B')=l=yx('6')+2;

* Associando X e U:

Parameter v(is),epson;

epson=0.1;

v('1')=-1; v('5')=3;
v('2')=epson; v('6')=4;
v('3')=1; v('7')=5;
v('4')=2;

Equations e19, e20, e21,e22,e23,e24(iw,is),e25(iw,is),
e26(iw,is),e27(iw,is),e28(iw,is);

e19.. sum(is,ys(is))=e=1;

e20.. ysil =e= sum(is, v(is)*ys(is));

e21 .. yx('1') + yw('2') =l= ys('1')+1;

e22 .. yx('1') + yw('3') =l= ys('2')+1;

e23 .. yx('1') + yw('1') =l= ys('1')+1;

e24(iw,is)\$ (ord(iw)=ord(is)).. yx('2') + yw(iw) =l= ys(is) +1;

e25(iw,is)\$ (ord(iw)=ord(is)-1).. yx('3') + yw(iw) =l= ys(is) +1;

e26(iw,is)\$ (ord(iw)=ord(is)-2).. yx('4') + yw(iw) =l= ys(is) +1;

e27(iw,is)\$ (ord(iw)=ord(is)-3).. yx('5') + yw(iw) =l= ys(is) +1;

e28(iw,is)\$ (ord(iw)=ord(is)-4).. yx('6') + yw(iw) =l= ys(is) +1;

* Bloco:

Equation

e29(j),e30(j),e31(j),e32(j),e33,e34a,e34b,e35a,e35b,e35c;

e29(j).. sum(i1, ycx(i1,j))=e=1;

* Equacao I:

e30(j).. ycx('D',j)=l= yc('D');

* Equacao II:

e31(j).. ycx('C',j)=l= yc('D')+yc('C');

e35a.. yc('B')+yc('C')=l=1;

e35b.. yc('B')+yc('D')=l=1;

e35c.. 3*yc('B')=l= 2+sum(j, ycx('B',j));

* Equacao III:

e34a.. yc('C')+yc('D')=l=1;

e34b.. 3*yc('C')=l= 2+sum(j, ycx('C',j));

* Equacao IV:

e32(j).. ycx('B',j)=l= yc('D')+yc('C')+yc('B');

e33.. yc('D')=l= sum(j, ycx('D',j));

*-----

Model modelo1 /e0,e1,e2,e3,e4,e5,

e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,e14,e15,e16,e17,e18

e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,e31,e32,e3
3,e34a,e34b,e35a,e35b,e35c,

f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7,f8,f9,

f1s,f2s,f3s,f4s,f5s,f6s,f7s,f8s,f9s,

f1a,f2a,f3a,f4a,f5a,f6a,f7a,f8a,f9a,

f1o,f2o,f3o,f4o,f5o,

f1u,f2u,f3u,f4u,f5u,f6u,f7u/;

Option limrow=100;

*teste.holdfixed=1;

Solve modelo1 using mip minimizing z;

Display ysil.l;

*-----Diagnostico-----

```
if(ysil.l eq -1,
display "=====Sem Requisito de
Seguranca=====";
);

if(ysil.l eq epon,
display "=====Sem Requisito Especial de
Seguranca====="); );

if(ysil.l eq 1,
display "=====SIL tipo
1====="); );

if(ysil.l eq 2,
display "=====SIL tipo
2====="); );

if(ysil.l eq 3,
display "=====SIL tipo
3====="); );

if(ysil.l eq 4,
display "=====SIL tipo
4====="); );

if(ysil.l eq 5,
display "===Apenas uma funcao instrumentada de seguranca
nao e suficiente==="); );
```

*=====MODELO DE ANALISE DE
SENSIBILIDADE=====

Variable z2;

Positive Variable mx,mr,ms,mu,mo;
Equation ez,e36,e37,e38,e41,e42,e43,e44,e45,e46,e47,e48;

Parameter ysil0; ysil0=ysil.l;

* Liberar a variavel x
x.lo=a1;
x.up=e1a;

* Liberar a variavel r
r.lo=a2;
r.up=e2a;

* Liberar a variavel s
s.lo=a3;
s.up=e3a;

* Liberar a variavel o
o.lo=a4;
o.up=c4;

* Liberar a variavel u
u.lo=a6;
u.up=d6;

ez.. z2=e= mx + mr + ms + mu + mo;

e37.. x-xo=l=mx;

e38.. -mx=l=x-xo;

e41.. r-ro=l=mr;

e42.. -mr=l=r-ro;

e43.. s-so=l=ms;

e44.. -ms=l=s-so;

e45.. o-oo=l=mo;

e46.. -mo=l=o-oo;

e47.. u-uo=l=mu;

e48.. -mu=l=u-uo;

Parameter M;

Binary Variables y1,y2,y3;

Equations e36a,e36b,e36c,e36d,e39,e40;

M=7;

e36a.. ysil=l=ysil0-ep+M*(1-y1);

e36b.. ysil+M*(1-y3)=g=ysil0+ep;

e36c.. ysil=l=ysil0+ep+M*(1-y2);

e36d.. ysil+M*(1-y2)=g=ysil0-ep;

e39.. y1+y2+y3=e=1;

e40.. y2=e=0;

Model modelo2 /ez,e1,e2,e3,e4,e5,
e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,e14,e15,e16,e17,e18

e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,e31,e32,e3
3,e34a,e34b,e35a,e35b,e35c,

f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7,f8,f9,

f1s,f2s,f3s,f4s,f5s,f6s,f7s,f8s,f9s,

f1a,f2a,f3a,f4a,f5a,f6a,f7a,f8a,f9a,

f1o,f2o,f3o,f4o,f5o,

f1u,f2u,f3u,f4u,f5u,f6u,f7u

e37,e38

e36a,e36b,e36c,e36d,e39,e40,e41,e42,

e43,e44,e45,e46,e47,e48/;

Solve modelo2 using mip minimizing z2;

Display ysil0;

Display z2.l,xo, x.l,ro, r.l,so,s.l,oo,o.l,uo,u.l,ysil.l;

ANEXO 1

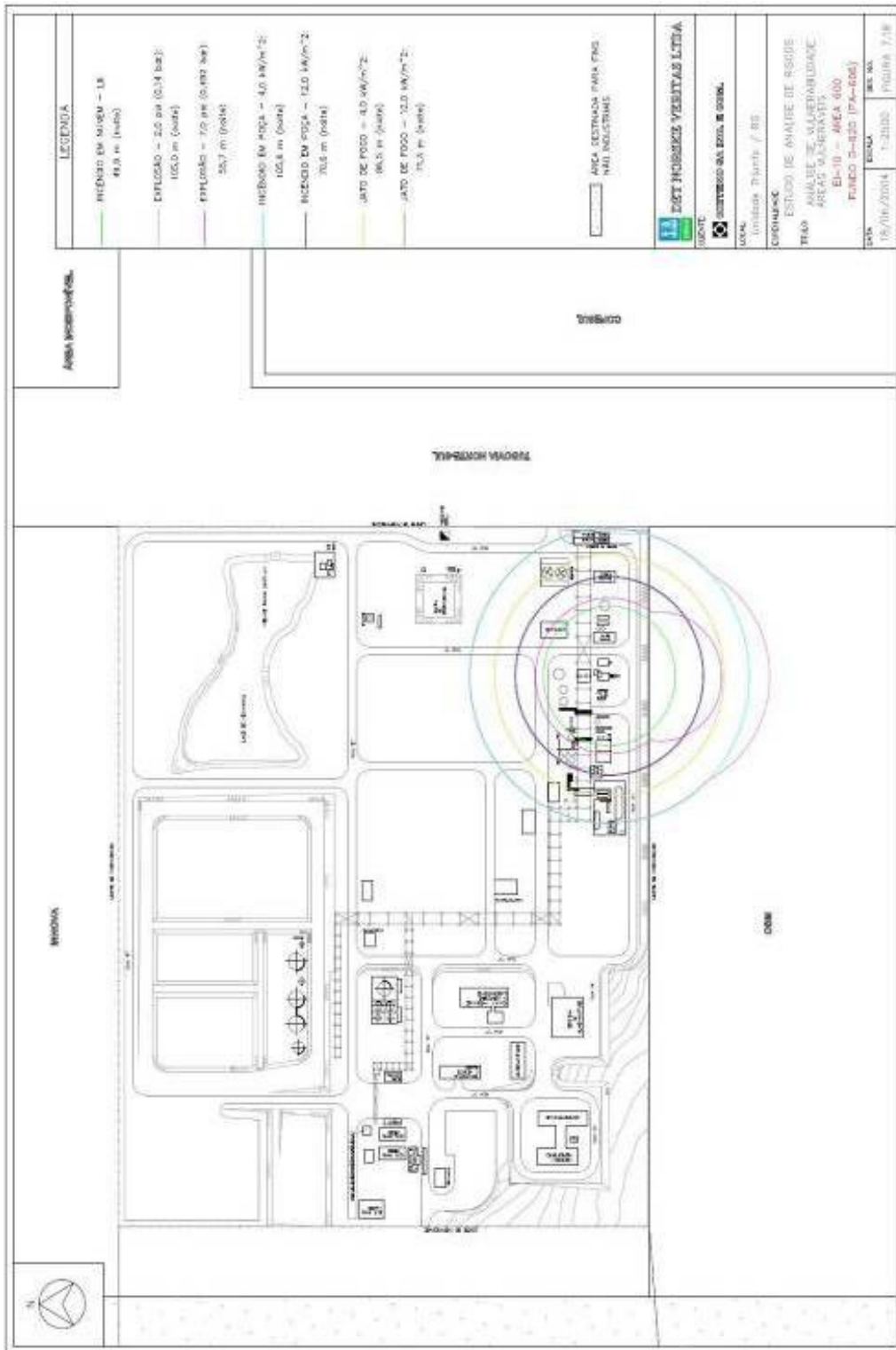


Figura A.1: Previsão da amplitude dos impactos oriundos de acidente de grandes proporções com vazamento na coluna D-620.

FONTE: Documentação interna da Oxiteno (trabalho realizado pela empresa Bureau Det Norske Veritas).