

UMA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE
ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO
(LOPA) NA AVALIAÇÃO DO RISCO DE
UMA PLANTA INDUSTRIAL

Celso de Freitas Filho (ff.celso@gmail.com)

Débora Maia Pereira (deboramp@gmail.com)

PROJETO FINAL DE CURSO

Orientadores:

Márcio Nele de Souza, D. Sc.

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

Setembro de 2008

UMA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO (LOPA) NA AVALIAÇÃO DO RISCO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL

Celso de Freitas Filho

Débora Maia Pereira

*Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química,
como parte dos requerimentos necessários à obtenção de grau de bacharel em
Engenharia Química.*

Aprovado por:

Prof. Caetano Moraes, Ph.D.

Prof. Antônio Carlos Marques Alvim, Ph.D.

Patrícia de Souza Pereira, Eng^a. Química

Orientado por:

Márcio Nele de Souza, D. Sc.

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

Setembro de 2008

Filho, Celso Freitas

Pereira, Débora Maia

Uma Aplicação da Técnica de Análise de
Camadas de Proteção (LOPA) na
Avaliação do Risco de uma planta
industrial/ Celso de Freitas Filho e Débora
Maia Pereira. Rio de Janeiro: UFRJ/ED,
2008.

X, 60 p. (UFRJ/EQ,2008)

Monografia - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Escola de Química, 2008.

Orientadores: Márcio Nele e Paulo

Fernando Ferreira Frutuoso e Melo.

1. LOPA 2. Camada de Proteção 3. Alto
Forno 4. Monografia (Graduação –
UFRJ/EQ) 5. Marcio Nele de Souza 6.
Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e
Melo

I. Bacharelado em Engenharia Química

*Aos nossos pais pelo amor,
compreensão, dedicação e
incentivo nos momentos
mais difíceis.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o fim de um ciclo em nossas vidas e hoje gostaríamos de agradecer a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta conquista. Nosso MUITO OBRIGADO:

Aos nossos pais que estiveram mais que presente todos esses anos.

À nossa família, pelo carinho, pela paciência em tolerar nossa ausência em alguns momentos e por acreditar no nosso sucesso.

Aos nossos orientadores Prof. Marcio Nele de Souza e Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo pelo interesse, disponibilidade e por acreditar que conseguiríamos.

À MMX por ceder informações da Siderurgia de Corumbá para realização deste trabalho, em especial os funcionários: Jorge Rodrigues, Vitor Feitosa, Vicente Cantini e Silene Xavier.

Ao Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, pelos comentários e sugestões.

A banca, Prof. Antônio Carlos Marques Alvim, Prof. Caetano Moraes e Eng.^a Patrícia de Souza Pereira por aceitarem participar da nossa banca, mesmo tendo um curto prazo de tempo para leitura. Sem a boa vontade de vocês não conseguiríamos.

A todos meus amigos, pela amizade e carinho, pelas inúmeras horas de estudo e trabalho, pelas sugestões, pelo apoio e grande incentivo.

Ao José Brito, pelo apoio e compreensão.

A nossa Madrinha Patrícia, pela ajuda com sua revisão crítica.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1.	Descrição do Trabalho.....	1
2.	ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO	2
2.1.	Introdução à LOPA.....	2
2.2.	Etapas da análise de camadas de proteção.....	4
2.3.	CONCEITOS E APLICABILIDADE NA LOPA.....	6
2.4.	Etapas da LOPA	7
2.4.1.	Etapa 1 - Identificar as Conseqüências para montar os Cenários.....	7
2.4.2.	Etapa 2 - Desenvolvimento de Cenários de Acidentes.....	7
2.4.3.	Etapa 3 – Estimar a Frequência do Evento Iniciador	10
2.4.4.	Etapa 4 – Identificar as IPL’s Disponíveis e Estimar as PFD’s	12
2.4.5.	Etapa 5 – Determinação da Frequência dos Cenários	16
2.4.6.	Etapa 6 – Avaliar o Risco para Tomada de Decisões.....	18
3.	DESCRIÇÃO DO SISTEMA – Auto Forno	20
3.1.	Princípio de Funcionamento do AF.....	22
3.2.	Carga do AF	23
3.2.1.	Carga metálica	23
3.2.2.	Combustível / redutor	23
3.2.3.	Fundentes.....	24
3.2.4.	Distribuição da carga no Interior do AF.....	24
3.3.	Comportamento da Carga no interior do AF.....	25
3.3.1.	Zona Granular.....	25
3.3.2.	Zona Coesiva	26
3.3.3.	Zona Úmida	26
3.3.4.	Zona Ativa	26
3.3.5.	Zona inativa	27
3.3.6.	Perda de carga nas zonas do AF	27
3.4.	Principais reações químicas do AF.....	28
3.4.1.	Evolução do Gás Redutor.....	28
3.4.2.	Reações dos óxidos de ferro	28
3.4.3.	Redução de outros óxidos.....	29
3.4.4.	Carburação da Gusa.....	29
3.4.5.	Dessulfuração da gusa	29
3.4.6.	Temperaturas de gás no topo	29
3.4.7.	Análise de gás do topo.....	29
3.5.	Parâmetros operacionais que influenciam a marcha do AF	30
3.5.1.	Velocidade do ar nas ventaneiras	30
3.5.2.	Temperatura de chama.....	30
3.5.3.	Volume de gás de rampa	30
3.5.4.	Volume de gás da cuba.....	31
3.5.5.	Índice de permeabilidade.....	31
3.6.	Aquecimento do ar de sopro.....	31
3.6.1.	<i>Cowpers</i>	32
3.6.2.	<i>Glendons</i>	33
3.7.	Refrigeração do AF	33
3.7.1.	Refrigeração tipo cortina d’água	33

3.7.2.	Refrigeração por placas	34
3.7.3.	Refrigeração por Staves Cooler.....	35
3.7.4.	Comparativo entre a refrigeração por <i>Stave Cooler</i> e Placas	36
3.7.5.	Sistema combinado (staves + placas)	37
3.8.	Tratamento e Distribuição de Gás	37
3.8.1.	Quantidade de poeira no gás.....	37
3.8.2.	Principais fases do tratamento do gás.....	38
4.	DESENVOLVIMENTO.....	40
4.1.	- Etapa 1 – Identificar as Conseqüências para Montar os Cenários	40
4.2.	Etapa 2 – Desenvolvimento de Cenários de Acidentes	44
4.3.	Etapa 3 - Identificação da frequência do evento iniciador	45
4.4.	Etapa 4 - Identificar as IPL's existentes e estimar a PFD	46
4.5.	Etapa 5 – Determinação da Frequência dos Cenários	49
4.6.	Etapa 6 – Estimativa do Risco	50
5.	CONCLUSÃO.....	58
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
FIGURA 2.1 CAMADAS DE PROTEÇÃO CONTRA UM POSSÍVEL ACIDENTE.....	3
FIGURA 2.2 ETAPAS DA LOPA.	4
FIGURA 3.1 PLANTA DE PROCESSO COM AF.....	21
FIGURA 3.2 DETALHES CONSTRUTIVOS DO AF.....	21
FIGURA 3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO AF.....	22
FIGURA 3.4 ZONAS DO AF.....	25
FIGURA 3.5 PERDA DE CARGA NAS ZONAS DO AF.....	27
FIGURA 3.6 <i>COWPERS</i>	32
FIGURA 3.7 <i>GLENDONS</i>	33
FIGURA 3.8 REFRIGERAÇÃO POR PLACAS	34
FIGURA 3.9 ESQUEMA DO <i>STAVES</i>	35
FIGURA 3.10 FLUXO DE ÁGUA NO <i>STAVES</i>	36
FIGURA 3.11 BALÃO DE PÓ OU COLETOR DE PÓ	38
FIGURA 3.12 LIMPEZA A ÚMIDO DO GÁS DO AF.....	39
FIGURA 4.1 MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS DA ANÁLISE DE RISCO DA APP.....	41

ÍNDICE DE TABELAS

		PÁGINA
TABELA 2.1	TABELA PARA DOCUMENTAÇÃO E CÁLCULOS DE CENÁRIOS PARA LOPA	9
TABELA 2.2	SALVAGUARDAS NORMALMENTE NÃO CONSIDERADAS IPL'S.....	13
TABELA 2.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MÉTODO DA MATRIZ.....	17
TABELA 2.4	MATRIZ DE RISCO COM ZONAS INDIVIDUAIS DE AÇÃO.....	19
TABELA 3.1	COMPARATIVO STAVE COOLER VRS PLACAS.....	36
TABELA 4.1	INFORMAÇÕES DA APP.....	42
TABELA 4.2	CATEGORIZAÇÃO DA CONSEQÜÊNCIA PARA EQUIPAMENTOS.....	43
TABELA 4.3	CATEGORIZAÇÃO DA CONSEQÜÊNCIA PARA INTOXICAÇÃO.....	43
TABELA 4.4	CATEGORIZAÇÃO DA CONSEQÜÊNCIA DE DANOS À VIDA BASEADA NA MATRIZ DE RISCO DA APP.....	44
TABELA 4.5	CENÁRIOS DA LOPA.....	44
TABELA 4.6	ESTIMATIVA DA FREQUENCIA DOS EVENTOS INICIADORES.....	46
TABELA 4.7	IPL'S E SALVAGUARDAS.....	48
TABELA 4.8	ESTIMATIVA DAS PFD'S DAS IPL'S.....	49
TABELA 4.9	FREQÜÊNCIA DOS CENÁRIOS.....	49
TABELA 4.10	CENÁRIO I.....	50
TABELA 4.11	CENÁRIO II.....	51
TABELA 4.12	CENÁRIO III.....	52
TABELA 4.13	CENÁRIO IV.....	53
TABELA 4.14	CENÁRIO V.....	54
TABELA 4.15	CENÁRIO VI	55
TABELA 4.16	CENÁRIO VII.....	56
TABELA 4.17	CENÁRIO VIII.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURA

AF	Auto Forno
ALARP	<i>“as low as reasonably practicable”</i> - tão baixo quanto razoavelmente praticável
APP	Análise Preliminar de Perigos
APS	Análise Probabilística de Segurança
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
FCC	Falha de Causa Comum
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i> - Análise de Perigos e Operabilidade
IPL	<i>Independent Protection Layer</i> - Camada de Proteção Independente
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i> - Análise de Camadas de Proteção
P^{dano}	Probabilidade de Dano ou Fatalidade
PFD	Probabilidade de Falha na Demanda
$P^{\text{ignição}}$	Probabilidade de Ignição
$P^{\text{pessoal presente}}$	Probabilidade de Pessoas Presentes na Área Exposta
SIF	<i>Safety Instrumented Function</i> - Função Instrumentada de Segurança
SIL	<i>Safety Integrity Level</i> - Nível de Integridade de Segurança
SIS	<i>Safety Instrumented System</i> - Sistema Instrumentado de Segurança

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. *Descrição do Trabalho*

A determinação do risco auxilia, indiscutivelmente, a tomada de decisão sobre a segurança do projeto e operação de plantas de processo. A análise de riscos surgiu para prever a frequência de acidentes, avaliar as conseqüências de acidentes prováveis, elaborar estratégias para impedir acidentes e para mitigar também os impactos adversos se um acidente ocorrer.

A Análise Quantitativa de Riscos (AQR) é um método que requer informações precisas para identificar onde em uma planta ou projeto pode-se fazer modificações de maneira a reduzir os riscos. A complexidade da AQR está associada à precisão das informações utilizadas e por esse motivo, na década de 90, o conceito de camadas de proteção começou a ser abordado. A primeira publicação foi realizada pelo CCPS (Center for Chemical Process Safety). A partir desses conceitos, diversas empresas nos Estados Unidos desenvolveram procedimentos internos para a realização da Análise de Camadas de Proteção (LOPA).

O objetivo deste trabalho é avaliar o risco do Auto Forno - AF de uma usina siderúrgica utilizando a técnica da LOPA. Esta técnica foi escolhida por ser mais simples do que a AQR, conseguindo assim, estimar o risco com certa precisão e num prazo menor. Como essa técnica não permite ser aplicada em sistemas muito complexos, foi escolhido o AF. Além disso, qualquer falha nesse sistema pode levar à indisponibilidade da usina e provocar conseqüências severas caso ocorra vazamento da gusa em temperaturas muito elevadas, acima de 1500 °C.

O capítulo 2 explica a técnica de Análise de Camadas de Proteção (LOPA), mostrando os tipos de sistemas que esta técnica pode ser aplicada e seu procedimento. No capítulo 3 são apresentadas informações gerais de um AF de

uma usina siderúrgica, sistema onde será aplicada a LOPA. O Capítulo 4 mostra a aplicação da LOPA neste sistema, e os resultados são encontrados no capítulo 5, seguido das conclusões no capítulo 6.

2. ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO

2.1. *Introdução à LOPA*

Em 2001 o CCPS publicou um livro que descreve a Análise de Camadas de Proteção. A LOPA é uma técnica simplificada de análise de riscos, com objetivo principal de determinar a existência de camadas de proteção suficientes para fazer frente a um cenário de acidente. Normalmente a LOPA é aplicada na seqüência de uma técnica qualitativa de identificação de perigo, entre elas, o HAZOP e a APP, mas também a partir de cenários oriundos de outras fontes, entre elas, análise de alternativas de projeto, investigações de incidentes e revisões de projeto.

Por não apresentar um valor exato e sim uma estimativa do risco, a LOPA é conhecida também como uma técnica semiquantitativa, sendo os resultados conservadores superestimando os riscos, adequado para avaliar o nível de integridade - SIL para Funções Instrumentadas de Segurança - SIF. A LOPA, assim como métodos qualitativos, apresenta um risco maior quando comparado aos métodos quantitativos (árvore de falhas, árvore de eventos..).

Um cenário pode demandar uma ou diversas camadas de proteção, dependendo da complexidade do processo e da severidade potencial de uma conseqüência. Em um determinado cenário, basta o sucesso de uma camada para que a conseqüência seja evitada. De maneira que o risco de acidente seja tolerável é necessário um número de camada de proteção suficiente. A figura 1 apresenta os diversos tipos de camadas de proteção possíveis.

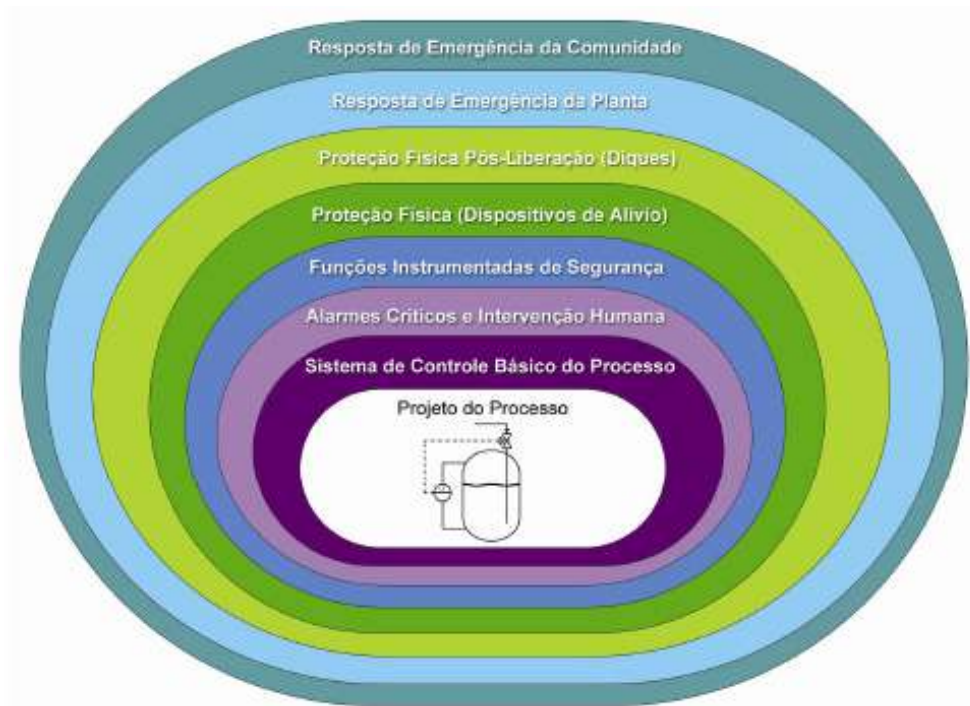


Figura 2.1 - Camadas de Proteção contra um possível acidente. [1]

Em muitos casos em que após a aplicação da LOPA, se o valor obtido não for aceitável, deve-se acrescentar Camadas de Proteção. Em todo caso, a LOPA não sugere quais IPL's ou qual projeto deve ser escolhido, mas auxilia no julgamento entre as alternativas de mitigação do risco.

Se for necessária uma compreensão mais ampla e completa do risco, métodos quantitativos mais rigorosos, tais como análise por árvores de falhas e/ou de eventos, ou Análise Quantitativa de Riscos (AQR) podem ser necessários. Percebe-se que essa compreensão pode afetar tanto o cálculo de freqüências como o de conseqüências.

A aplicabilidade da LOPA não está limitada a uma fase específica do ciclo de vida da planta ou de um processo. Porém, obtêm-se melhores resultados nas fases de projeto e modificações de um processo existente.

2.2. Etapas da análise de camadas de proteção

A LOPA avalia um par causa-conseqüência como um cenário de cada vez. Após a formação dos cenários, o analista de LOPA determina quais salvaguardas existentes (controles administrativos ou de engenharia) atendem à definição de IPL, e então estima o risco do cenário. As aproximações adotadas dependem da experiência do analista com a LOPA e com o processo em consideração. A implantação da LOPA é dividida em 6 etapas que estão ilustradas na Figura 2.2.

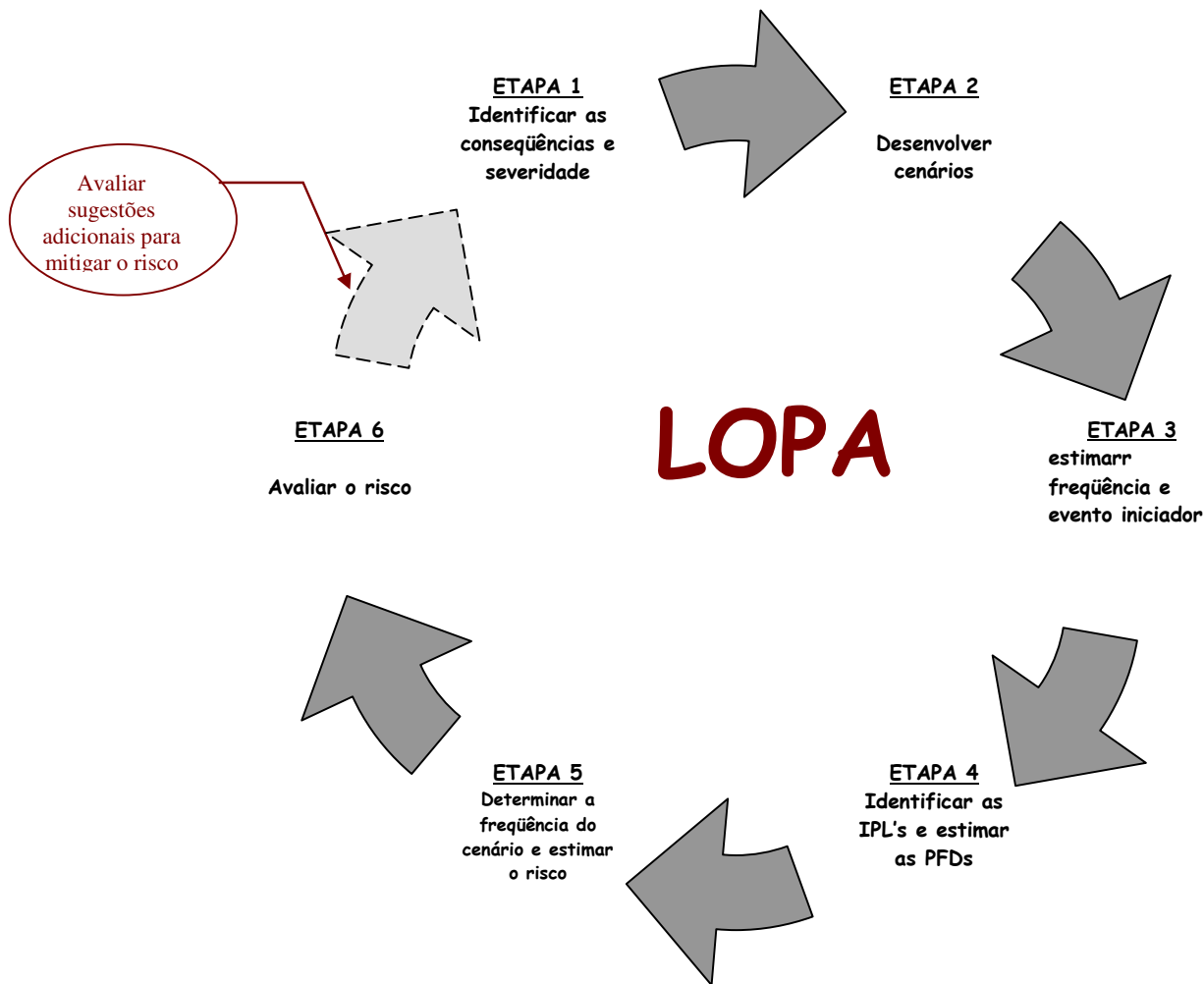


Figura 2.2 - Etapas da LOPA.

Etapa 1 – Identificar as conseqüências para montar os cenários

A conseqüência é identificada durante uma análise de perigos qualitativa (por exemplo, APP e HAZOP), em seguida é avaliada e sua magnitude estimada.

Etapa 2 – Desenvolvimento de Cenários de Acidentes

A LOPA é aplicada a um par causa-conseqüência por vez. Cada cenário deve ter apenas um evento iniciador e uma conseqüência. Se o mesmo evento iniciador puder resultar em conseqüências diferentes, devem ser desenvolvidos cenários adicionais.

Etapa 3 – Estimar a Frequência do Evento Iniciador

A frequência do evento iniciador é normalmente expressa em eventos por ano e deve conduzir a conseqüências (salvaguardas falhas).

Etapa 4 – Identificar as IPL's Disponíveis e Estimar as Probabilidades de Falha na Demanda – PFD's

O ponto central da LOPA é reconhecer as salvaguardas disponíveis que atendem às exigências de camadas de proteção independentes para um dado cenário.

Etapa 5 – Determinar a Frequência do Cenário e Estimar o Risco

Após a identificação dos cenários e das IPL's, calcula-se a frequência do cenário mitigado, combinando a frequência do evento iniciador com as probabilidades de falha na demanda das IPL's.

Etapa 6 – Avaliar o Risco para Tomar Decisões

O risco estimado de um cenário é comparado com os critérios de tolerância de risco da empresa ou com os objetivos relacionados.

2.3. CONCEITOS E APLICABILIDADE NA LOPA

Um **cenário** é um evento não planejado ou uma seqüência de eventos que resultam numa conseqüência indesejada. Cada cenário é constituído de pelo menos dois elementos: evento iniciador e uma conseqüência.

Evento Iniciador deve conduzir à conseqüência (todas as salvaguardas falhando).

Conseqüências são os efeitos indesejados dos cenários de acidentes. Na LOPA, as conseqüências são estimadas por uma ordem de magnitude de severidade, que requer muito menos esforço que modelagem matemática, e ainda facilita a comparação do risco de diferentes cenários. Uma das primeiras decisões que uma empresa deve tomar quando escolher implementar a LOPA é como definir as conseqüências finais. Algumas empresas avaliam até a perda de material, outras estimam o impacto final em termos de prejuízo ou danos.

Eventos habilitadores são fatores que não são nem falhas nem camadas de proteção (IPL's).

Uma **IPL** é um dispositivo, sistema ou ação que é capaz de evitar um cenário com conseqüências indesejadas do evento iniciador ou ação de qualquer outra camada de proteção associada com o cenário.

A **PFD** para uma IPL é a probabilidade que, quando demandada, não realizará a tarefa requerida

2.4. Etapas da LOPA

2.4.1. Etapa 1 - Identificar as Conseqüências para montar os Cenários

Em geral, a LOPA avalia cenários desenvolvidos em um estudo anterior, sendo assim, o primeiro passo é examinar estes cenários. Existem vários métodos para examiná-los, entre eles o baseado nas conseqüências. Neste caso a conseqüência é identificada durante uma análise de perigos qualitativa (por exemplo, APP ou HAZOP) e em seguida a conseqüência é avaliada e sua magnitude estimada.

Depois de definido que a LOPA será a técnica utilizada deve-se definir o estado final de uma conseqüência e esses estados devem ser quantificados por algum método estimativo. Por exemplo, no caso de uma liberação, sua severidade e magnitude podem ser medidas em termos da quantidade de material liberada.

Qualquer método de avaliação de risco tem com parte a avaliação das conseqüências. As conseqüências a serem avaliadas e a profundidade da avaliação dependem de diversos fatores, incluindo o risco associado aos cenários de acidente, a metodologia de avaliação de risco adotada, e os recursos que a empresa está disposta a fornecer para refinar a estimativa. O método usado para a categorização de conseqüências deve ser consistente com os critérios de tolerância de risco da empresa.

2.4.2. Etapa 2 - Desenvolvimento de Cenários de Acidentes

Nesta etapa são avaliados os eventos iniciadores e falhas das IPL's que levam a uma conseqüência indesejada. LOPA é aplicada em um cenário de cada vez, isto é, um único par causa-conseqüência é analisado por vez. Cada cenário deve ter apenas um evento iniciador e uma conseqüência. Se o mesmo evento

iniciador puder resultar em conseqüências diferentes, devem ser desenvolvidos cenários adicionais.

Além do evento iniciador e da conseqüência, um cenário pode incluir também:

- condições ou eventos habilitadores, que precisam ocorrer ou estar presentes antes que o evento iniciador resulte em uma conseqüência;
- falhas de salvaguardas (que podem ser IPL's).

Em geral para todos os cenários haverá pelo menos uma proteção que pode ser considerada uma IPL para a proposta da LOPA. Se esta IPL operar como esperado, a seqüência de eventos será interrompida e a conseqüências indesejadas não irá ocorrer.

A maioria dos métodos de avaliação de perigos é qualitativa e não possibilita avaliar se o risco associado com o perigo é aceitável, podendo tornar o julgamento inconsistente. O método da LOPA pode utilizar dados levantados em uma análise qualitativa anterior e atribuir valores numéricos para a freqüência do evento iniciador, freqüência de falha e probabilidade de falha na demanda (PFD) e determinar se uma proteção é suficiente.

Deve-se identificar e documentar todos os passos importantes do evento desde o evento iniciador até a conseqüência para formar um cenário. Todos os fatores que possam afetar o cálculo numérico da freqüência da conseqüência ou da magnitude devem ser considerados, para que o evento iniciador seja relacionado com as conseqüências e IPL's específicas.

O próximo passo é confirmar se a conseqüência está especificada usando o mesmo critério do método da LOPA. Depois, é identificar se as proteções localizadas estão operando como deveriam, evitando as conseqüências do

cenário. O melhor é listar todas as proteções para um cenário particular antes de decidir quais são as verdadeiras IPL's.

A Tabela 2.1 é um exemplo de como documentar as informações necessárias para o desenvolvimento completo de um cenário (CCPS, 2001).

Número do Cenário: 01		Número do Equipamento:		Título do Cenário:	
Data:	Descrição		Probabilidade	Frequência (ano-1)	
Conseqüência (Descrição/ Categoria)	Incendio na planta				
Critério Tolerância de Risco (Categoria ou Frequência)					
Evento Iniciador	Furo na carcaça do AF				
Condição/ Evento Habilitador					
Modificações Condicionais (se aplicável)	Probabilidade de Ignição				
	Probabilidade de pessoas presentes na área afetada				
	Probabilidade de ferimento fatal				
	Outros				
Frequência da Conseqüência não mitigada					
Camadas de Proteção Independentes - IPL's					
Sistema de Controle Básico					
Intervenção Humana					
SIF					
Dispositivo de Alívio					
Outras Camadas de Proteção (devem ser justificadas)					
Salvaguardas não IPL's					
Frequência da Conseqüência mitigada					
Critério Tolerância de Risco é atendido? (SIM/ NÃO)					
Ações Necessárias para atender o Critério de					
Observações:					

Tabela 2.1 - TABELA PARA DOCUMENTAÇÃO E CÁLCULOS DE CENÁRIOS PARA LOPA.

Após a identificação do evento iniciador para um cenário específico, são determinados as condições ou evento habilitador presentes. Na seqüência identificam-se as salvaguardas existentes e se elas ocorrerem como planejado, impedirão que a conseqüência ocorra.

Ao longo da análise, informações adicionais se tornam disponíveis e as suposições feitas anteriormente podem ser questionadas. Em alguns casos, esta análise pode conduzir ao desenvolvimento de novos cenários, já que se adquire uma maior compreensão do sistema.

2.4.3. Etapa 3 – Estimar a Frequência do Evento Iniciador

Como já foi dito anteriormente, cada cenário tem um único evento iniciador, que normalmente é expresso em eventos por ano. Os eventos iniciadores podem ser agrupados em três tipos gerais:

- eventos externos, fenômenos naturais, eventos provenientes de incêndio ou explosão nas proximidades, intervenções por impactos mecânicos nos equipamentos ou equipamentos de construção (terremotos, enchentes, quedas de aeronaves, grandes acidentes em plantas adjacentes, sabotagem, terrorismo...).
- falha no sistema de controle e falha mecânica (falha no sistema de controle de emergência, falha no vaso ou na tubulação ocasionada por fadiga, corrosão, erro de projeto, especificação, etc.);
- falha humana, que pode ser proveniente de erro operacional, erro de manutenção, erro a respostas críticas ou erros de programação.

Os eventos habilitadores ou condições habilitadoras consistem de operações ou condições que não são diretamente a causa do cenário, mas que devem estar presentes para a ocorrência do cenário. Esses eventos são expressos como probabilidades.

Em geral, o evento iniciador pode ser uma combinação de um evento habilitador (probabilidade) e uma falha subsequente ou ação não apropriada (frequência).

Muitos dados de taxa de falha contêm dados com dois ou mais algarismos significativos, o que é muito mais preciso do que o requerido pela LOPA. A LOPA somente requer uma aproximação em ordem de magnitude, e tais dados devem ser trazidos para próximo da ordem de magnitude.

Existem várias fontes de dados de taxa de falha com valores consistentes às frequências de evento iniciador, entre elas:

- dados industriais de falha de equipamentos: Guideline for Process Equipment Reliability Data, CCPS (1986), Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, CCPS (1989), Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis 2nd ed., CCPS (2000), Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, and Sensing Component Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations, IEEE (1984) e OREDA - Offshore Reliability Data (2002);
- dados industriais de taxas de erros humanos: Inherently Safer Chemical Processes: A life Cycle Approach, CCPS (1996) e Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, Swain, A.D., and H.E. Guttman, (1983);
- histórico da empresa, (incluindo a experiência da equipe de análise de perigos);
- Dados de fabricantes.

Observa-se que a experiência do operador é uma fonte melhor para eventos específicos. Como muitas empresas não têm um bom banco de dados

interno para taxa de falha de equipamentos os dados de taxa de falhas genéricos são melhores (CCPS, 2001).

A LOPA assume que a taxa de falhas é constante, mesmo não sendo completamente verdade, já que taxas de falhas são tipicamente mais altas quando o equipamento é novo (mortalidade infantil) ou antigo (envelhecimento). Para a finalidade da LOPA, uma taxa constante é adequada, já que para a maioria dos equipamentos, o período mais longo de operação, isto é, o período de vida útil envolve uma taxa de falhas constante.

Algumas vezes os dados de falha são expressos como probabilidade de falha na demanda (PFD). Nesse caso, a frequência do evento iniciador deve ser estimada, mas isto envolve estimativas do número de vezes por ano que uma demanda está localizada no sistema. Existem técnicas mais sofisticadas para estimar o número de demandas realizadas por ano em um sistema, com uma árvore de falha, mas como a LOPA é uma aproximação simplificada, os analistas só devem mudar para técnicas mais rigorosas se o cenário for muito complexo ou se for necessária uma maior precisão.

2.4.4. Etapa 4 – Identificar as IPL's Disponíveis e Estimar as PFD's

O ponto central da LOPA é reconhecer as salvaguardas disponíveis que atendem as exigências de camadas de proteção independentes para um dado cenário. Se todas as IPL's de um cenário falharem, conseqüências indesejadas ocorrerão em seguida ao evento iniciador. Se a salvaguarda nem sempre puder detectar a condição ou circunstância e gerar uma ação específica, ela não é uma IPL.

A diferença entre uma IPL e uma salvaguarda deve ficar bem definida. Uma salvaguarda é qualquer dispositivo, sistema ou ação que poderá interromper a cadeia de eventos seguida do evento iniciador. Entretanto, a eficiência de algumas salvaguardas não pode ser quantificada devido à falta de dados, incerteza com independência ou outros fatores. As salvaguardas podem ser classificadas como:

- ativas ou passivas;
- preventivas (antes da liberação) ou mitigadoras (após a liberação).

Algumas salvaguardas não são normalmente consideradas IPL's, tais como: treinamento e certificações; procedimentos; proteção de incêndio; testes; sinais; manutenção; comunicações; entre outras. Como mostra a tabela 2.2.

Salvaguardas normalmente não consideradas IPL's	Comentários
Treinamento e Certificação	Podem ser considerados na avaliação da PFD para ação de operador, mas não são considerados IPL's.
Procedimentos	Podem ser considerados na avaliação da PFD para ação de operador, mas não são considerados IPL's.
Testes e Inspeções	Testes e inspeções normais afetam a PFD de determinadas IPL's. Aumentar os intervalos de testes e inspeções pode aumentar a PFD de uma IPL.
Manutenção	Manutenção afeta a PFD de determinadas IPL's.
Comunicações	É uma suposição básica que exista comunicação adequada em uma planta. Comunicação ruim afeta a PFD de determinadas IPL's.
Avisos	Os avisos não são IPL's. Eles podem ser confusos, obscuros, ignorados, etc. Podem afetar a PFD de determinadas IPL's.
Proteção contra Incêndio	Freqüentemente, proteção contra incêndio não é considerada uma IPL porque atua após o evento, para a maioria dos cenários, e sua disponibilidade e eficácia pode ser afetada pelo incêndio ou explosão que se pretende conter. Entretanto, se uma organização puder demonstrar que a proteção contra incêndio atende às exigências de uma IPL para um determinado cenário, pode ser considerada como IPL.

Tabela 2.2 – Salvaguardas normalmente não consideradas IPL's. [4]

Para ser considerada uma IPL, um dispositivo, sistema ou ação deve ser:

- eficaz na prevenção da conseqüência;
- independente do evento iniciador e dos componentes de qualquer IPL presente no mesmo cenário;
- auditável.

O processo de auditoria deve confirmar que a IPL é eficaz em impedir a consequência se funcionar adequadamente e confirmar se o projeto, a instalação, os testes funcionais e os sistemas de manutenção da IPL estão aptos a alcançar a PFD especificada para a IPL. Testes funcionais devem confirmar se todos os componentes de uma IPL estão operando normalmente e se atendem aos requisitos da LOPA. A auditoria deve documentar a condição atual da IPL, as modificações feitas desde a última auditoria, e acompanhar a execução de ações corretivas caso sejam necessárias.

A LOPA utiliza independência para assegurar que os efeitos do evento iniciador, ou de outras IPL's, não interajam com uma IPL específica. Esta independência requer que o sucesso de uma IPL seja independente da ocorrência ou das consequências do evento iniciador, e de falhas de qualquer componente de uma IPL já considerada para o mesmo cenário.

É importante procurar falhas de causa comum ao analisar salvaguardas, pois podem envolver o evento iniciador e uma ou mais salvaguardas, ou a interação de várias salvaguardas. Todas as salvaguardas afetadas por falhas de causa comum devem ser consideradas somente como uma única IPL (ao invés de cada salvaguarda ser considerada uma IPL).

Algumas condições podem ser usadas para guiar os analistas a fazer julgamentos mais precisos ao determinar se uma salvaguarda é uma IPL:

- se as salvaguardas não podem sempre detectar condições e gerar uma ação específica, não serão uma IPL's;
- as salvaguardas têm que detectar condições a tempo para tomar a ação corretiva que prevenirá uma consequência indesejada. Este tempo requerido deve incluir: tempo para detectar a condição; tempo para processar a informação e tomar a decisão; tempo para tomar a ação requerida e tempo para a ação surtir efeito;

- Para a ação humana ser considerada como uma IPL, alguns fatores devem ser definidos e documentados: como será detectada, como a decisão para agir será tomada e que ação será tomada para prevenir a consequência.

Todas as IPL's são salvaguardas, mas nem todas as salvaguardas são IPL's. A eficiência de uma IPL é quantificada em termos de probabilidade de falha na demanda que é definida com a probabilidade de um sistema (nesse caso da IPL) falhar na performance de uma função específica na demanda.

Como a LOPA é um método simplificado, os valores das PFD's são normalmente aproximados à ordem de magnitude mais próxima. O intervalo de valores de PFD varia da mais fraca IPL (1×10^{-1}) a mais forte IPL ($1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$). Após determinar se a uma salvaguarda é uma IPL, deve-se analisar o valor adequado da PFD para a IPL.

A PFD para uma IPL é a probabilidade que, quando demandada, não realize a tarefa requerida. A falha na realização pode ser causada por:

- um componente de uma IPL estar num estado falho ou inseguro quando ocorrer um evento iniciador;
- enfraquecimento de um componente durante a realização de suas tarefas;
- enfraquecimento da intervenção humana para ser eficiente, etc.

CCPS (2001) fornece valores para PFD de diversas IPL's típicas. Se as condições da instalação ou da operação forem atípicas para uma IPL, o valor de sua PFD deve ser revisto e ajustado para condições específicas. Quando IPL's estiverem instaladas em circunstâncias severas (por exemplo, válvulas de escape, ambiente corrosivo), deve ser considerado o uso de valores mais elevados de PFD.

2.4.5. Etapa 5 – Determinação da Freqüência dos Cenários

Nesta etapa, os cenários identificados na etapa anterior e as IPL's estimadas serão usados para calcular a freqüência do cenário mitigado, combinando a freqüência do evento iniciador com as probabilidades de falha na demanda das IPL's. Os cálculos podem ser quantitativos, utilizando estimativas numéricas, ou através do uso de tabelas de referência. A tomada de decisão será baseada no valor obtido para a freqüência do cenário.

Este é o procedimento geral para calcular a freqüência de um cenário de liberação, com um estado final de conseqüência específico. Para este cenário, a freqüência do evento iniciador da etapa 3 é multiplicada pelo produto das PFD's das IPL's determinadas na etapa 4.

A equação 2-1 é aplicada para situações de baixa demanda.

$$f_i^C = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} = f_i^I \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \dots \times PFD_{ij} \quad (2-1)$$

Onde:

f_i^C Freqüência relativa para a conseqüência C para o evento iniciador i

f_i^I Freqüência do evento iniciador para o evento iniciador i

PFD_{ij} Probabilidade de falha em demanda da j IPL que protege contra a conseqüência C para o evento iniciador i

Nos cálculos para altas demandas, somente a freqüência de uma liberação é considerada e os outros tipos de eventos existentes são incluídos na freqüência como eventos inflamáveis, tais como incêndio e explosão; efeitos tóxicos onde aplicáveis; exposição à flamabilidade ou efeitos tóxicos; dano ou fatalidade. O resultado da equação (2-1) pode ser usado como entrada para comparação do

risco calculado para o cenário dos critérios de tolerância de risco para os métodos de tomada de decisão, porém esta técnica não será abordada neste trabalho..

CCPS (2001) apresenta alguns métodos para estimar o risco de um cenário. Neste estudo foi utilizado o método da matriz que faz uso de tabelas de referências na categorização de conseqüências como descrito a seguir.

2.4.5.1. Método da Matriz

A matriz de risco é um método generalizado de mostrar visualmente a freqüência tolerada para um cenário, baseada na severidade da conseqüência e a freqüência do cenário. A tabela 8.1 do CCPS, 2001 mostra o método da matriz, onde é feita uma combinação da categoria da conseqüência e a freqüência calculada, resultando numa célula que irá informar o grau de redução de risco requerido para o cenário. O método da matriz pode ser a aproximação mais extensamente usada para tomar decisões de risco com a LOPA. Na tabela 2.3 estão listadas as vantagens e desvantagens do Método da Matriz.

Vantagens	Desvantagens
A redução do risco requerida pode ser demonstrada visualmente e numericamente e várias áreas de decisão de redução de risco são facilmente descritas;	A desvantagem deste método é que o desenvolvimento de uma matriz usual com sua matriz de conseqüência associada requer meios e técnicos experientes.
Os valores numéricos de tolerância do risco atual usados por uma empresa podem ser embutidos na matriz, caso elas não queiram usar os critérios explícitos;	
A precisão de muitos métodos da matriz de risco faz deles métodos bem ajustados para usar com o método da LOPA com seu uso de suposições conservativas e simplificadas;	
Tomada de decisão fácil desde que somente um cenário por vez esteja envolvido na decisão do risco.	

Tabela 2.3 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MÉTODO DA MATRIZ

2.4.6. Etapa 6 – Avaliar o Risco para Tomada de Decisões

Após o desenvolvimento dos cenários e o risco existente estimado, deve-se então tomar a decisão e determinar se o risco de um cenário está dentro dos critérios de tolerância. Se o risco é inaceitável, camadas adicionais de proteção são necessárias.

Um fator importante na tomada de decisão em relação ao risco do cenário é o julgamento. Um julgamento requer uma boa compreensão do processo que está sendo analisado e da eficácia relativa das várias camadas protetoras encontradas durante a análise. Três tipos básicos de julgamento do risco são usados conjuntamente com a LOPA:

- (1) Comparação do risco calculado com critérios de tolerância predeterminados. Este é o método predominante.
- (2) Julgamento feito por um especialista de risco qualificado.
- (3) Comparação relativa entre alternativas que competem para a redução do risco.

Para tomar alguma decisão, o resultado do risco calculado na etapa anterior é comparado a critérios que estão relacionados a uma medida de risco máximo tolerado. Na tabela 2.4 , uma matriz de risco estabelece as zonas individuais de ação. Se o risco calculado for menor do que os critérios de risco, o cenário é julgado como tendo risco suficientemente baixo, ou como tendo suficiente mitigação (IPL's). Entretanto, se o risco excede os critérios, o cenário requer mitigação adicional ou até mesmo mudanças no projeto, para que se torne inerentemente mais seguro, reduzindo a frequência ou a consequência do cenário, ou ainda (preferivelmente), eliminando-o.

Como não existe na bibliografia matriz de risco para este tipo de cenário, a Tabela 2.4 foi adaptada da tabela 8.1 do CCPS, 2001.

Frequência da Conseqüência (por ano)	Categoria da Conseqüência				
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
10^0	Opcional (avalie alternativas)	Opcional (avalie alternativas)	Ação na oportunidade seguinte	Ação imediata	Ação imediata
10^{-1}	Opcional (avalie alternativas)	Opcional (avalie alternativas)	Opcional (avalie alternativas)	Ação na oportunidade seguinte	Ação imediata
10^{-2}	Nenhuma ação adicional	Opcional (avalie alternativas)	Opcional (avalie alternativas)	Ação na oportunidade seguinte	Ação na oportunidade seguinte
10^{-3}	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Opcional (avalie alternativas)	Opcional (avalie alternativas)	Ação na oportunidade seguinte
10^{-4}	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Opcional (avalie alternativas)	Opcional (avalie alternativas)
10^{-5}	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Opcional (avalie alternativas)
10^{-6}	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional
10^{-7}	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional	Nenhuma ação adicional

TABELA 2.4: MATRIZ DE RISCO COM ZONAS INDIVIDUAIS DE AÇÃO [4]

Para o método de critérios numéricos, o risco máximo tolerado para um cenário é desenvolvido com base em uma variedade de categorias de conseqüência. Por exemplo, uma empresa pode estabelecer como seu critério a frequência máxima (por ano ou por 1000 horas) de uma única fatalidade. Isto pode

ser derivado de critérios como o risco individual máximo aos empregados. Outras empresas podem escolher a frequência de liberação de material, de incêndios, etc.

A análise custo-benefício também é frequentemente usada para comparar o valor de opções que competem entre si. Esta técnica suplementa as aproximações básicas de julgamento do risco. Por exemplo, é comum identificar mais de uma IPL potencial para reduzir o risco de um cenário. A análise custo-benefício pode ser usada para selecionar uma IPL entre diversas IPL's candidatas. Essa análise compara o custo da consequência evitada e sua frequência, com o custo da redução do risco que determinada IPL promove.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA - AF

O ferro gusa ou gusa é uma liga obtida no estado líquido, composta de ferro (90 a 95%), carbono (3,0 a 4,8%) e mais alguns elementos de liga (silício e manganês) a uma temperatura que varia de 1300 °C a 1550 °C.

Para produção de gusa podemos utilizar os processos: AF, *Corex* e Forno elétrico de redução. No Brasil, toda a gusa é produzida através do AF, logo a necessidade de entendermos melhor este sistema.

Podemos definir AF como um aparelho metalúrgico, considerado como um reator contínuo, onde se processa a redução dos óxidos de ferro e a fusão da carga, obtendo como produtos: "Ferro Gusa (Ferro Fundido de 1.^a fusão), Escória e Gás".

Podemos observar uma planta de processo com AF na figura 3.1 e os detalhes construtivos do AF são mostrados na figura 3.2.



Figura 3.1 - Planta de processo com AF.(Fonte:MMX)

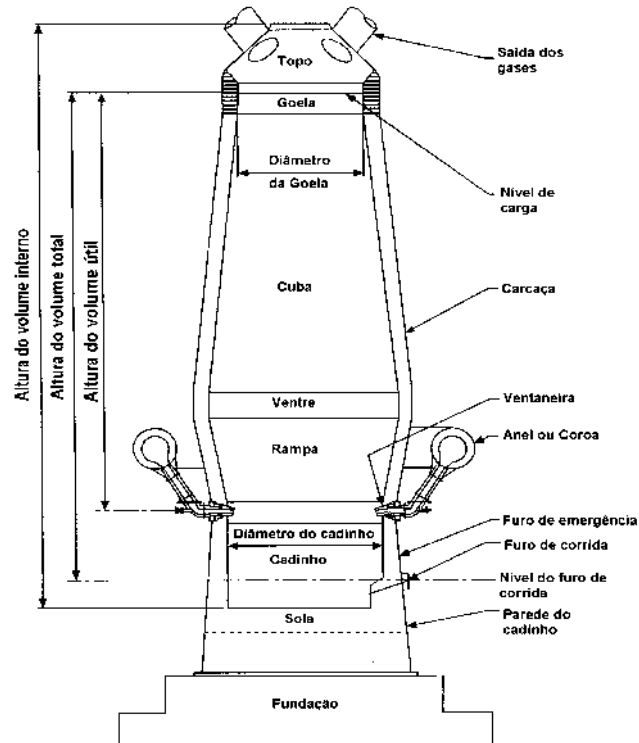


Figura 3.2 - Detalhes construtivos do AF. .(Fonte:MMX)

3.1. Princípio de Funcionamento do AF

O princípio de funcionamento do AF baseia-se em fluxos em contra corrente. Um de cima para baixo onde descem o minério de ferro, combustível sólido e fundentes e outro de baixo para cima onde se movem os gases resultantes da combustão do carbono do combustível com o oxigênio do ar insuflado a temperaturas relativamente altas. Durante este movimento de descida de carga e subida dos gases ocorrem as transformações químicas (redução do minério de ferro) e físicas (fusão da gusa e da escória). O princípio de funcionamento do AF está demonstrado na figura 3.3.

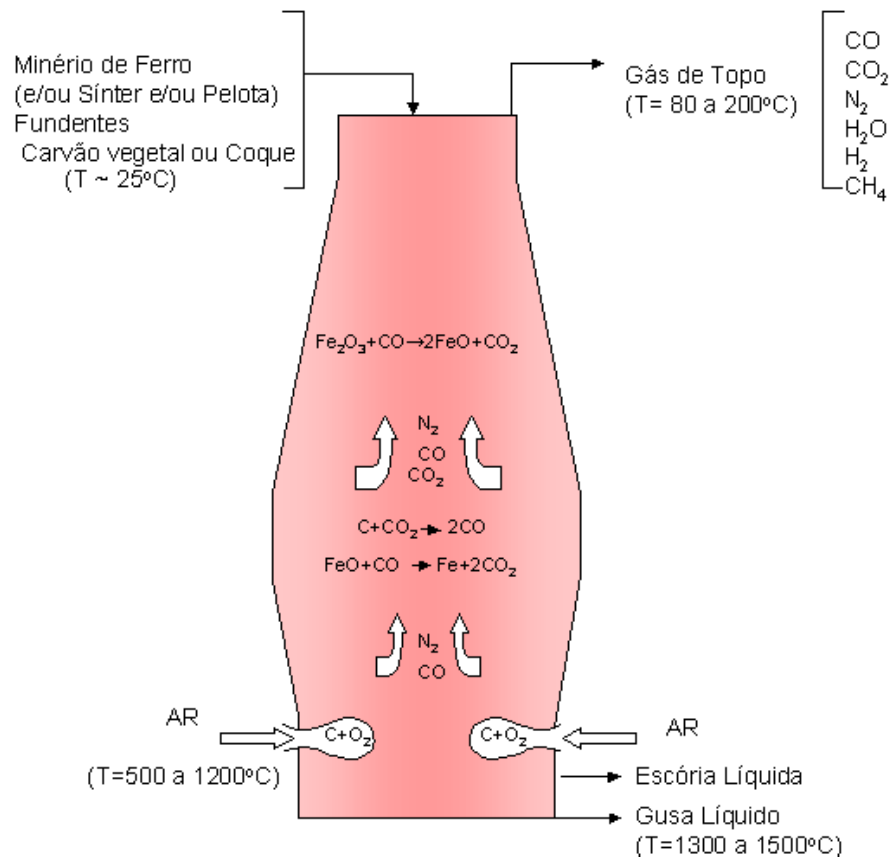


Figura 3.3 - Princípio de funcionamento do AF. (Fonte:MMX)

Podemos observar que a carga é carregada na parte superior do AF à temperatura ambiente e os gases são gerados na sua parte inferior (zona de

combustão), a partir da queima do combustível, a uma temperatura em torno de 2000°C.

Na figura 3.3 pode-se observar que o AF é alimentado com metálicos (pelota, *sínter* e minérios de ferro), combustível sólido (coque ou carvão vegetal) e fundentes (calcário, quartzo e dolomita). Seus produtos líquidos são gusa (ferro gusa) e escória (produto constituído pelas impurezas da carga e pelas cinzas do combustível). Seu produto gasoso é o gás de AF, sendo este o gás que sai pelo topo do AF, arrastando com ele determinada quantidade de poeira. Por se tratar de uma fonte de energia, este gás deverá ser limpo antes de ser usado como gás combustível.

3.2. Carga do AF

3.2.1. Carga metálica

Minério de ferro e/ou aglomerados (pelota e *sínter*). É responsável pelo fornecimento do ferro, que está sempre combinado quimicamente com outros elementos, principalmente oxigênio, formando óxidos de ferro.

3.2.2. Combustível / redutor

Carvão vegetal ou coque. Tem o objetivo de fornecer calor para o pré-aquecimento e fusão da carga; fornecer gás redutor para a eliminação gradativa do oxigênio que está combinado com o ferro no minério; De ser elemento permeabilizante garantindo a permeabilidade da carga, principalmente na zona de amolecimento e fusão; ser elemento estrutural, auxiliando na sustentação da coluna de carga.

3.2.3. Fundentes

Calcário, Quartzo, Dolomita e outros. São utilizados para combinar com as impurezas do processo (ganga do minério e cinzas do combustível) e possibilitar a formação de escórias de baixo ponto de fusão e que sejam suficientemente fluidas para o escoamento. A principal característica da escória é a sua fluidez, o que depende da sua composição e da temperatura.

A carga deve ser preparada antes de entrar no AF. Devemos dispensar cuidados nesta etapa, pois o combustível ocupa cerca de 70% do volume útil do AF.

Compreende-se como preparação da carga o recebimento, estocagem, manuseios internos, controle físico e químico, peneiramento e pesagem das matérias primas. Indiscutivelmente é a área mais importante para a operação de um AF sendo responsável pela obtenção de maiores produtividades, menores consumos específicos e atendimento quanto à qualidade desejada para o gusa.

Como o funcionamento de um AF se baseia em dois fluxos em contra corrente (descida da carga e ascensão dos gases), conclui-se que a coluna de carga deve ser permeável o suficiente para permitir a passagem dos gases e garantir a sua distribuição uniforme. Logo não restam dúvidas quanto à importância da preparação das matérias primas, principalmente no que se refere ao peneiramento e separação de faixas granulométricas.

3.2.4. Distribuição da carga no Interior do AF

O sucesso de uma boa operação do AF irá depender da garantia de uma boa permeabilidade no interior do mesmo, que por sua vez irá determinar a eficiência da aplicação do gás e estes fatores estão diretamente relacionados com as condições e forma de distribuição da carga.

Do ponto de vista do melhor aproveitamento gasoso, a distribuição ideal é aquela que determina a obtenção do maior percentual de CO_2 no gás de topo. Este maior percentual representa o melhor aproveitamento do potencial redutor do gás, uma vez que é menor o percentual de CO .

3.3. Comportamento da Carga no interior do AF

Podemos observar na figura 3.4 a existência de zonas distintas no interior do AF.

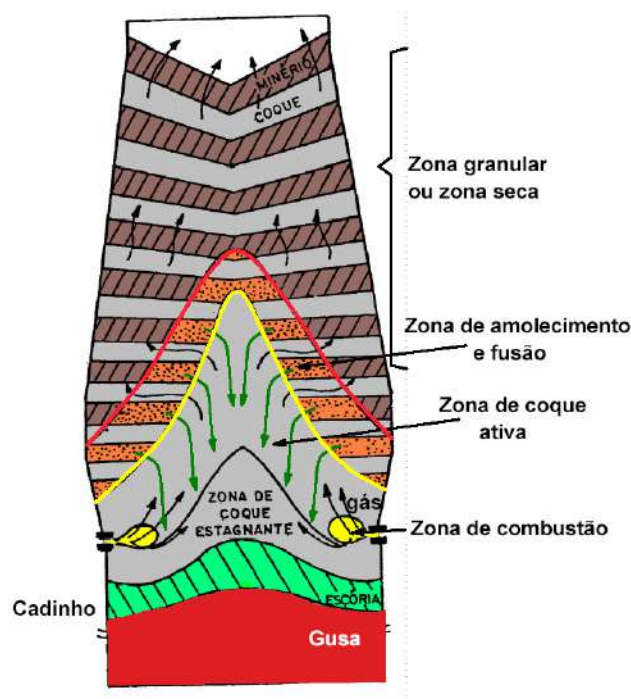


Figura 3.4 - Zonas do AF. .(Fonte:MMX)

3.3.1. Zona Granular

A Zona Granular é a região onde toda a carga se encontra no estado sólido. Sabemos que, quanto maior a participação de finos em leitos granulados, menor é o índice de vazios e maiores a resistência ao escoamento de um fluido, que no caso do AF poderá contribuir para a ocorrência de fenômenos que degradam a

marcha do mesmo, como arriamento e engaiolamentos, devendo então ser rigorosamente controlados.

Devido a esse fator, é importante controlar algumas propriedades das matérias-primas: granulometria, crepitação, redutibilidade, resistência a frio, resistência após redução. Para o combustível, deve-se conhecer e controlar a granulometria, reatividade, resistência após reatividade e resistência a frio.

3.3.2. Zona Coesiva

A Zona Coesiva é a região onde os componentes da carga metálica e fundentes iniciam o amolecimento e se fundem. Esta zona tem papel importantíssimo na operação do AF, primeiro porque é nela que ocorre a maior perda de carga (resistência ao escoamento gasoso) e segundo porque o bom aproveitamento da redução de minério na zona granular vai depender de uma boa distribuição gasosa na zona de amolecimento e fusão.

Portanto, para que possamos melhorar as condições de escoamento gasoso, seria ideal que esta zona fosse a mais estreita possível, o que equivale dizer que a carga metálica deve ter um alto ponto de amolecimento.

3.3.3. Zona Úmida

A Zona Úmida (fases líquidas) está localizada abaixo da zona coesiva, onde todos os materiais carregados, exceto o combustível (coque ou carvão vegetal), encontram-se na fase líquida.

3.3.4. Zona Ativa

Zona ativa do combustível (coque ou carvão vegetal) é a região onde ocorre a movimentação do coque ou do carvão vegetal no sentido da zona de combustão.

3.3.5. Zona inativa

Zona inativa do combustível (coque ou do carvão vegetal) é a região onde ocorre o escoamento das fases líquidas (gusa e escória) para o cadinho e comporta o material que auxilia na sustentação da coluna de carga.

3.3.6. Perda de carga nas zonas do AF

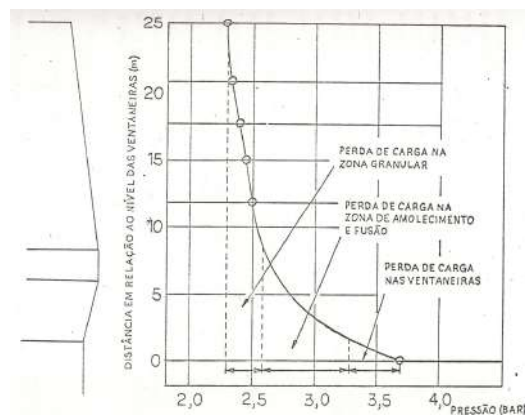


Figura 3.5 - Perda de carga nas zonas do AF. (Fonte:MMX)

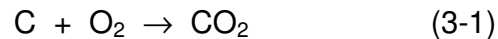
Para resolver o problema da perda de carga, podemos atuar na adequação da composição da carga metálica, modificação da temperatura de amolecimento das matérias-primas e na distribuição da carga no topo do forno, uma vez que o formato da zona coesiva é determinado pelas condições de carregamento das diversas matérias-primas.

3.4. Principais reações químicas do AF

3.4.1. Evolução do Gás Redutor

Devido à velocidade do ar quente insuflado pelas ventaneiras, o combustível é empurrado dando lugar a uma cavidade denominada “*race way*”, onde o combustível circula em movimentos rápidos, enquanto se queima.

O oxigênio do ar soprado entra em contato com o carbono do combustível incandescente e reage segundo a reação 3-1.



O CO₂ formado reage novamente com carbono do combustível formando CO por meio da reação 3-2.



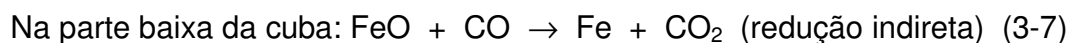
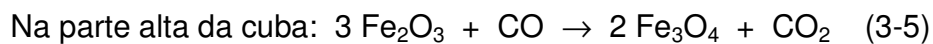
A reação 3-3 que ocorre na região das ventaneiras.



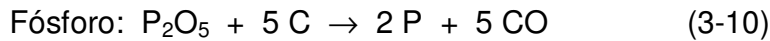
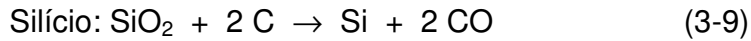
Como o ar soprado contém umidade, sua decomposição ocorre segundo a seguinte reação 3-4, cujo resultado é o aumento dos teores de CO e H₂ no gás.



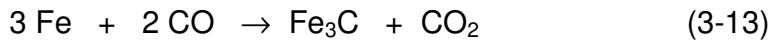
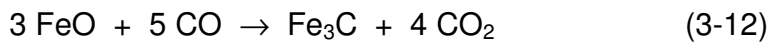
3.4.2. Reações dos óxidos de ferro



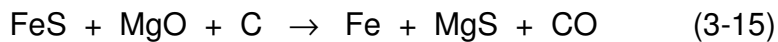
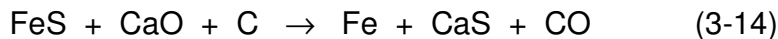
3.4.3. Redução de outros óxidos



3.4.4. Carburação da Gusa



3.4.5. Dessulfuração da gusa



3.4.6. Temperaturas de gás no topo

Para um mesmo nível de carga e mesmas condições de marcha, a elevação das temperaturas de topo significa um desequilíbrio térmico, provocado possivelmente por um arriamento de carga.

3.4.7. Análise de gás do topo

A análise do gás de topo pode ser feita de modo contínuo ou intermitente. Normalmente são analisados os seguintes elementos:

- Hidrogênio (H₂) - Um aumento no percentual de H₂ pode significar a entrada anormal de água para o interior do forno.

- Monóxido de carbono (CO) - Para uma mesma carga, um aumento no percentual de CO (ou queda no percentual de CO₂) significa piora nas condições de redução do minério, o que significa piora na marcha do AF.

- Dióxido de carbono (CO₂) - Um aumento brusco no percentual de CO₂ é sinal de engaiolamento.

- Nitrogênio (N₂).

3.5. Parâmetros operacionais que influenciam a marcha do AF

3.5.1. Velocidade do ar nas ventaneiras

É influenciada pelo volume do ar soprado, pela a área total das ventaneiras, pela temperatura, pressão e umidade do ar soprado. Geralmente operamos com a velocidade do ar nas ventaneiras em torno de 180 a 250 m/s.

O aumento do volume ou da temperatura do ar soprado faz aumentar a velocidade do ar nas ventaneiras, enquanto que o aumento da área das ventaneiras e da pressão do ar soprado fazem diminuir a velocidade do ar nas ventaneiras.

3.5.2. Temperatura de chama

Quando muito elevada provoca encurtamento do “*race way*”, acarretando marcha mais periférica e conseqüentemente maior desgaste do revestimento refratário. É normal operar com temperaturas de chama entre 1900°C (AF a carvão vegetal), até 2300°C (AF a coque).

3.5.3. Volume de gás de rampa

É influenciado pelo volume e umidade do ar soprado, pelo volume de oxigênio de enriquecimento e pela taxa de injeções auxiliares (óleo, finos de carvão ou vapor).

3.5.4. Volume de gás da cuba

É influenciada pelo volume de gás de rampa, pelo índice de vazios da carga, pelo volume útil e altura útil do AF, pela pressão de ar soprado e pela pressão do topo.

O controle é feito pela contra pressão no topo do AF. Maior pressão no topo reduz a velocidade do gás na cuba, obtendo maior aproveitamento térmico e redução do gás, acarretando em menor consumo de combustível. Geralmente esta velocidade varia entre 2,4 a 3,0 m/s.

3.5.5. Índice de permeabilidade

Esse parâmetro é calculado e indica a maior ou menor facilidade dos gases ascendentes atravessarem a coluna de carga. É influenciado pela pressão do ar soprado, pela pressão do topo e pelo volume do gás de rampa.

3.6. *Aquecimento do ar de sopro*

Se o ar fosse introduzido frio pelas ventaneiras do AF, maior quantidade de combustível seria consumida para gerar as calorias necessárias para o processo.

Utilizando-se uma parte dos gases que saem no topo do AF para pré-aquecer o ar, obtém-se considerável economia de combustível sólido, aumento da temperatura de chama em frente às ventaneiras e aumento da produtividade do AF.

O ar proveniente dos turbo sopradores pode ser pré-aquecido em *cowpers* ou *glendons*.

3.6.1. Cowpers

Recebeu este nome devido ao inventor Edward Alfred Cowper. São aparelhos que armazenam calor em seu empilhamento refratário, durante o período em que o gás é queimado em sua câmara de combustão. Posteriormente cedem este calor ao ar, que atravessa o seu empilhamento aquecido, antes de ser soprado para o AF. Desta forma conseguimos alcançar até 1300 °C no ar que será introduzido no AF através das ventaneiras.

Os *Cowpers* apresentam: Alta eficiência térmica, elevado custo de montagem, baixo custo de manutenção e vida útil longa – Processo intermitente.

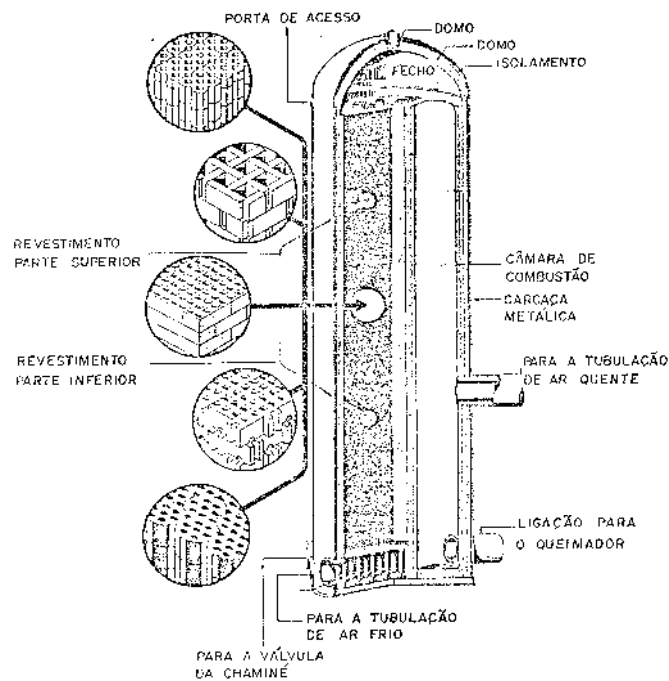


Figura 3.6 – Cowpers. (Fonte:MMX)

3.6.2. Glendons

São constituídos por serpentinhas internas de tubos, no interior das quais circula o ar que será soprado no AF, enquanto que externamente aos tubos é queimado o gás, sendo possível atingir temperatura de no máximo 800 °C no ar pré-aquecido.

Os *Glendons* apresentam: Baixa eficiência térmica, baixo custo de montagem, elevado custo de manutenção e vida útil curta – processo contínuo.

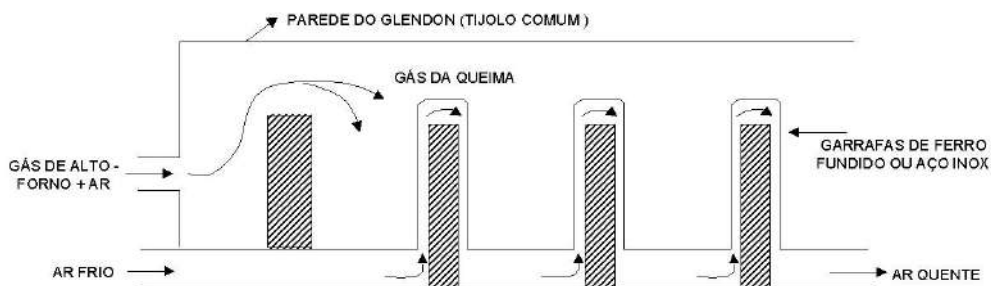


Figura 3.7 – *Glendons*.(Fonte:MMX)

3.7. Refrigeração do AF

A vida útil de um AF é função da eficiência do seu sistema de refrigeração.

Podemos citar 4 tipos de sistema de refrigeração que são comumente usados:

3.7.1. Refrigeração tipo cortina d'água

Este é o sistema mais simples, de menor custo, de menor risco, porém é o menos eficiente. A água percorre a carcaça metálica do Alto-Forno externamente e é coletada na sua base para recirculação, após ser resfriada. Para ser utilizada no processo a água não exige tratamento químico, porém deve-se manter o

cuidado de fazer limpezas periódicas na carcaça metálica do alto-forno, já que comumente há formação e aderência de uma camada, na carcaça do forno, que funciona como isolamento, diminuindo ainda mais a eficiência da refrigeração. Geralmente este sistema é utilizado em AF de pequena capacidade.

3.7.2. Refrigeração por placas

O sistema é constituído por caixas ou placas retangulares de cobre, inseridas no revestimento refratário e a água é forçada a circular nos labirintos internos destas placas. A eficiência deste sistema de refrigeração é função da quantidade de placas/m² de área de revestimento, ou seja, depende da densidade de placas. É importante que a água seja quimicamente tratada para retirada dos sais minerais (água desmineralizada) e que circule em circuito fechado, para não haver contaminação. O inconveniente deste sistema é a maior dificuldade em descobrir e sanar possíveis vazamentos de água para o interior do Alto-Forno.

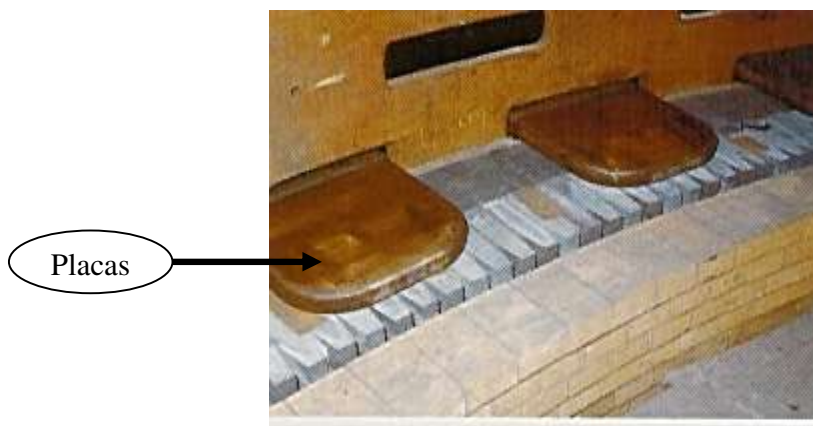


Figura 3.8 - Refrigeração por placas. .(Fonte:MMX)

3.7.3. Refrigeração por Staves Cooler

São peças fundidas, de ferro ou cobre, instaladas nas paredes dos AFs, entre a carcaça metálica e o revestimento refratário, contendo canais ou tubulações internas, também fundidas, por onde circulará a água de refrigeração.

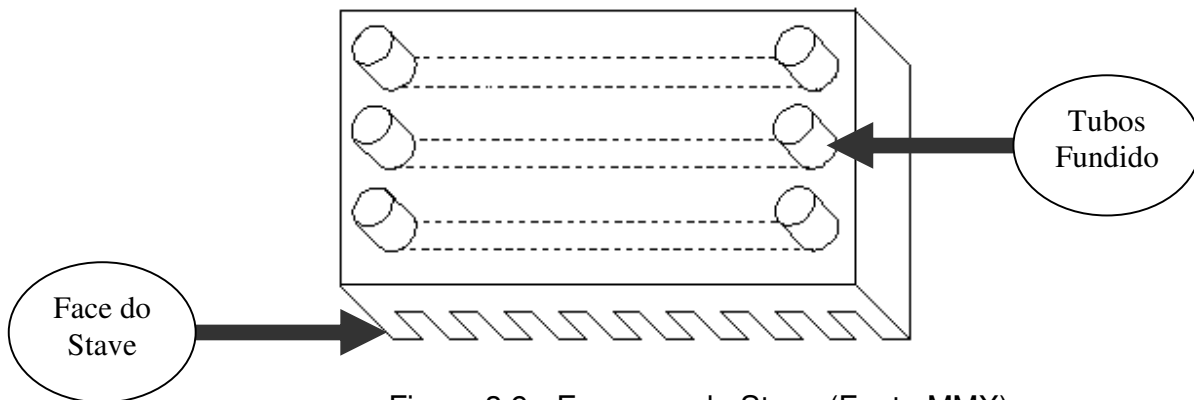


Figura 3.9 - Esquema do Stave.(Fonte:MMX)

3.7.3.1. Características Gerais dos Staves

- Presença de refratário na face de trabalho (face quente), para reduzir abrasão e carga térmica;
- Sistema de circulação forçada de água;
- Possui pontos para instalação de termopares;
- Menor espessura de parede (stave + refratário), aumentando o volume interno do AF.

3.7.3.2. Esquema de circulação de água nos Staves

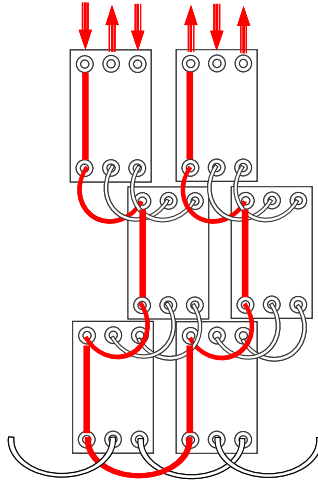


Figura 3.10 - Fluxo de água nos Staves. .(Fonte:MMX)

3.7.4. Comparativo entre a refrigeração por *Stave Cooler* e Placas

Item	Stave Cooler	Placas
Volume interno do AF	Maior	Menor
Desgaste do revestimento refratário	Regular	Irregular
Efeito na distribuição de carga	Menor	Maior
Solicitações da carcaça	Baixa	Alta
Vida útil do AF	Maior	Menor
Eficiência de refrigeração	Maior	Menor
Custo de Manutenção	Menor	Maior
Custo Operacional	Menor	Maior
Investimentos	Maior	Menor
Reposição	Reforma	Paradas Programadas

Tabela 3.1 – Comparativa *Stave Cooler* X Placas.(Fonte:MMX)

3.7.5. Sistema combinado (staves + placas)

Trata-se da montagem de staves nas regiões mais solicitadas do Alto-Forno e de placas naquelas de menor exigência térmica. O custo é o fator determinante para a definição quanto ao tipo de refrigeração.

3.8. Tratamento e Distribuição de Gás

O gás que sai no topo do AF arrasta grande quantidade de poeira, exigindo um prévio tratamento para a sua utilização. A poeira é proveniente dos componentes da carga e a sua quantidade varia entre 15 e 25 g/m³ de gás.

3.8.1. Quantidade de poeira no gás

A quantidade de poeira no gás varia em função de:

- **Quantidade de material fino na carga:** Quanto maior a quantidade de finos na carga, maior será a quantidade de poeira no gás.
- **Volume de ar soprado:** Maior volume aumenta a quantidade de poeira no gás, devido ao maior arraste.
- **Nível de carga no forno:** Níveis de carga mais baixos favorecem ao maior arraste de poeira.
- **Contra pressão no topo:** O emprego de contra pressão no topo, contribui para reduzir a quantidade de poeira no gás.

3.8.2. Principais fases do tratamento do gás

3.8.2.1. Limpeza primária

Elimina parcialmente as partículas por via seca. É feita no balão de pó ou coletor de pó. Essa eliminação será mais eficiente quando: a velocidade do gás for baixa; as partículas forem mais pesadas e maiores; a viscosidade do gás for baixa.

No coletor de pó o gás é forçado a mudar de direção para sair pela parte superior. Essa mudança de direção leva a uma perda de velocidade, fazendo com que as partículas mais pesadas se separem por gravidade.

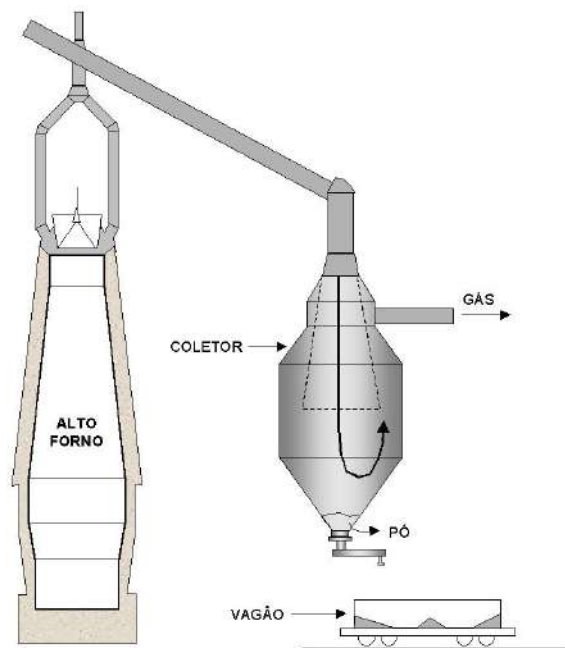


Figura 3.11 - Balão de pó ou Coletor de pó.(Fonte:MMX)

3.8.2.2. Limpeza secundária.

Após a limpeza primária, o gás ainda contém cerca de 5 g de poeira e essa quantidade deve ser baixada para valores inferiores a 10 mg/m³, para permitir a utilização racional e econômica do gás. A limpeza secundária é dificultada pela granulometria da poeira. A eficiência da limpeza secundária depende das condições de pressão e vazão das linhas de gás e de água.

O sistema de limpeza adequado deverá ser projetado conforme as condições operacionais de cada AF. Pode ser feita através de 2 processos:

- Limpeza a úmido - Utiliza-se água para umedecer as partículas e elevar a sua massa a tal ponto que se permita a separação clássica (por gravidade). No método de impacto utiliza-se a perda da energia cinética das partículas ao se chocarem com o fluxo de água sob pressão. Os aparelhos normalmente usados são as torres saturadoras ou de pulverização e os venturis.

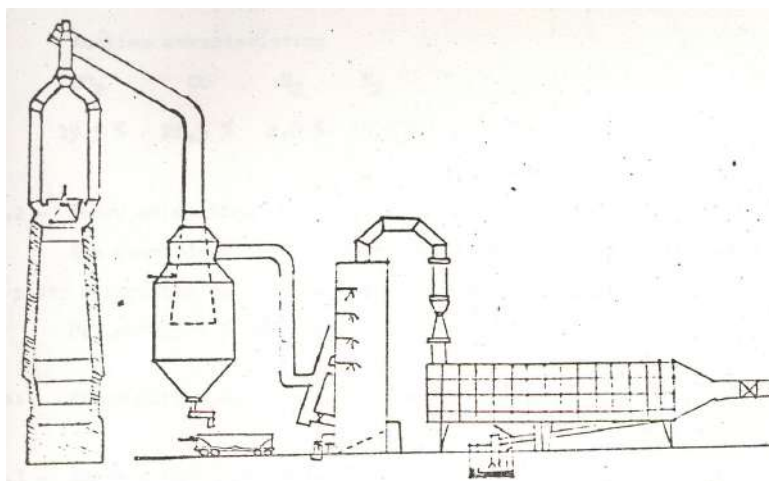


Figura 3.12 - Limpeza a úmido do gás do AF.(Fonte:MMX)

- Limpeza a seco - Podemos realizar a limpeza a seco através de ciclones e/ou precipitadores eletrostáticos.

Ciclones: Consiste em passar o gás através de um tecido apropriado, para reter as poeiras finas e assegurar a limpeza do gás a níveis de 5 a 7 mg/m³.

Precipitador eletrostático: Consiste em fazer o gás passar através de um campo eletrostático intenso. As partículas sólidas se ionizam ao passar pelo campo, ou seja, elas se carregam de eletricidade e são atraídas pelas placas metálicas com polaridade contrária. As placas são limpas através de sprays de água, que removem o material aderido e escoam para um selo d'água situado no fundo do aparelho.

Depois destes processos, o gás limpo é armazenado em gasômetros e distribuído puro ou misturado com outros gases mais ricos (gás natural, gás de coqueria, gás de forno elétrico de redução), para utilização em: aquecimento do ar (cowpers ou glendons); fornos de reaquecimento de lingotes; secagem e aquecimento de panelas de gusa e de aço; Secagem e aquecimento de carros torpedos; fornos de tratamentos térmicos, etc.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. - Etapa 1 – Identificar as Conseqüências para Montar os Cenários

Como já foi mencionado anteriormente, as informações utilizadas nesse trabalho foram extraídas de uma APP realizada em uma usina siderúrgica. O capítulo 3 apresentou informações gerais do funcionamento de um sistema de AF's.

Na APP utilizada como base para este estudo foram identificados 185 cenários, dos que 89 apresentavam categoria de risco ALTO, sendo esta categorização foi baseada na matriz de risco da companhia, apresentada na figura 4.1. Como ainda assim tínhamos um número muito elevado de cenários para aplicar a LOPA, buscamos outra forma de filtragem, que foi o grau de severidade. Filtrando agora nos 185 cenários os que tinham severidade IV, também baseado na matriz de risco figura 4.1, apenas duas causas levavam a um severidade máxima: os cenários 12 e 22, descritos na tabela 4.1.

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS DA ANÁLISE DE RISCOS	EXTREMAMENTE REMOTA (E) Falha estrutural de equipamentos estáticos. Falhas múltiplas de sistemas de proteção.	REMOTA (D) Falhas múltiplas no sistema (humana e/ou equipamentos). Falha estrutural / mecânica de equipamentos rotativos.	OCASIONAL (C) Uma única falha (humana ou equipamento). Sem registro em situações similares anteriores (pelo menos 30 anos).	PROVÁVEL (B) Uma ocorrência durante a vida útil do sistema. Pelo menos um registro em situações anteriores e nenhuma modificação no sistema ou nos proced. que reduza a chance de ocorrência.	FREQUENTE (A) Esperada uma ou mais ocorrências do cenário a cada ano de operação do sistema. Vários registros em situações similares anteriores.
CATASTRÓFICA (IV) Com potencial para causar várias vítimas fatais ou danos irreversíveis ao meio ambiente.	M	A	A	A	A
CRÍTICA (III) Com potencial para causar uma ou poucas vítimas fatais ou grandes danos ao meio ambiente. Com potencial de causar lesões incapacitantes ou perda de membros.	B	M	A	A	A
MODERADA (II) Com potencial para causar ferimentos ao pessoal ou pequenos danos ao meio ambiente. Acidentes com afastamento (CAF).	B	B	M	M	A
BAIXA OU INSIGNIFICANTE (I) Incidentes / acidentes operacionais que podem causar indisposição ou mal-estar ao pessoal e danos insignificantes ao meio ambiente. Acidentes sem afastamento (SAF).	B	B	B	M	M




	RISCO BAIXO - Necessárias Soluções a Longo Prazo
	RISCO MODERADO - Necessárias Soluções a Médio Prazo
	RISCO ALTO - Soluções Imediatas

FIGURA 4.1: Matriz de classificação dos cenários da análise de risco da APP (Fonte: Relatório N°. RPR092/2007 da MMX)

É importante ressaltar que estes cenários seguem a numeração original dos cenários gerados da APP consultada. Visto que neste estudo serão gerados outros cenários, usaremos algarismos romanos para ordenar os cenários gerados neste estudo.

Cenários	Causa	Conseqüência	Salvaguardas
12	Furo na carcaça do AF	<ul style="list-style-type: none"> - Incêndio - Lesões pessoais - Fatalidade -Intoxicação 	<ul style="list-style-type: none"> - Existência de procedimentos para incendiar os pequenos vazamentos de gás nas ventaneiras/timpas; - Existência de procedimentos prevendo as condições para o acesso às plataformas do Alto-Forno (ex: uso de carboxímetro); - Área ventilada; - Existência de termopares para monitorar a temperatura do topo do AF;
22	Ruptura da mangueira de refrigeração	<ul style="list-style-type: none"> - Queima/explosão da ventaneira e timpa; - Lesões pessoais; - Danos materiais; - fatalidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de refrigeração de emergência.

TABELA 4.1 – INFORMAÇÕES DA APP

A LOPA utiliza algumas tabelas para categorizar as conseqüências para equipamentos e intoxicação, tabelas 4.2 e 4.3 foram retiradas do CCPS 2001. Como entre as conseqüências dos cenários selecionados existem danos à vida e livro da LOPA, CCPS 2001, não fornece informações sobre formas de categorizar este tipo de conseqüências, adaptamos a matriz de risco utilizada na APP, figura 4.1, para o sistema de categorização da LOPA, como mostra a tabela 4.4.

Características da Conseqüência	Magnitude da Perda			
	Equipamento poupado ou não essencial	Planta indisponível menos de 1 mês	Planta indisponível de 1 a 3 meses	Planta indisponível mais do que 3 meses
Dano mecânico a carcaça do AF ou a mangueira de refrigeração	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
Danos mecânicos aos sistemas auxiliares do AF a mangueira de refrigeração	Categoria 2	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4

TABELA 4.2: CATEGORIZAÇÃO DA CONSEQÜÊNCIA PARA EQUIPAMENTOS

Característica da liberação / Tamanho da liberação	1-10 lb liberado	10-100 lb liberado	100-1000 lb liberado
Extremamente tóxica, acima do BP*.	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
Extremamente tóxica, abaixo do BP*.	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
Altamente tóxica, abaixo do BP*.	Categoria 2	Categoria 2	Categoria 3

*BP = Ponto de bolha na pressão atmosférica

TABELA 4.3: CATEGORIZAÇÃO DA CONSEQÜÊNCIA PARA INTOXICAÇÃO

	EXTREMAMENTE REMOTA	REMOTA	OCASIONAL	PROVÁVEL	FREQÜENTE
CATASTRÓFICA	CATEGORIA 3	CATEGORIA 4	CATEGORIA 5	CATEGORIA 5	CATEGORIA 5
CRÍTICA	CATEGORIA 2	CATEGORIA 3	CATEGORIA 4	CATEGORIA 4	CATEGORIA 5
MODERADA	CATEGORIA 1	CATEGORIA 2	CATEGORIA 3	CATEGORIA 3	CATEGORIA 5
BAIXA	CATEGORIA 1	CATEGORIA 1	CATEGORIA 2	CATEGORIA 3	CATEGORIA 4

TABELA 4.4: CATEGORIZAÇÃO DA CONSEQÜÊNCIA DE DANOS À VIDA BASEADA NA MATRIZ DE RISCO DA APP

4.2. Etapa 2 – Desenvolvimento de Cenários de Acidentes

Como na LOPA os cenários são formados pelo par causa-conseqüência, um par por vez, na tabela 4.5 são apresentados os oito cenários onde serão aplicados a LOPA.

Cenários	Evento iniciador	Conseqüência
I	Furo na carcaça do AF	Incêndio
II		Lesões pessoais
III		Fatalidade
IV		Intoxicação
V	Ruptura da mangueira de refrigeração	Queima / explosão da ventaneira e timpa
VI		Lesões pessoais
VII		Danos materiais
VIII		fatalidade

TABELA 4.5: CENÁRIOS DA LOPA

4.3. Etapa 3 - Identificação da frequência do evento iniciador

Os eventos iniciadores são eventos que levam às conseqüências. Neste estudo serão as causas identificadas na APP: ruptura da mangueira do sistema de refrigeração e o furo na carcaça do AF.

Nesta etapa pesquisamos em diversas bases de dados as taxa de falha dos equipamentos em questão, mas não obtivemos sucesso. Outra fonte de busca seriam dados operacionais da planta, porém como esta se encontra em operação há apenas 2 anos, ainda não possui banco de dados formado.

O fabricante do AF recomenda que o revestimento interno do seu produto seja substituído a cada 4 anos de operação. Como o furo na carcaça é causado pelo desgaste dos tijolos refratários que constituem o revestimento interno do AF, este dado do fabricante será utilizado como frequência do evento iniciador.

Com relação à mangueira de refrigeração buscamos dados de trocadores de calor, equipamento que tem função semelhante à exercida pela mangueira. A partir de informações fornecidas pela operação da usina, de que em menos de 2 anos a planta já parou diversas vezes, acreditamos que o valor encontrado no OREDA 2002, está superestimado. Dessa forma utilizamos a taxa de falha de uma falha por ano, já que a mangueira foi umas das causas das paradas.

As estimativas das frequências dos eventos iniciadores estão listadas na tabela 4.6.

Evento iniciador	Frequência (ano⁻¹)	Considerações e Fontes
Furo na carcaça do AF	0,2475	- O fabricante recomenda que o revestimento interno do AF deva ser trocado a cada 4 anos. - Estimamos que 99% dos AF's teriam este comportamento, devido à uniformidade dos AF's utilizados na siderurgia.
Ruptura da mangueira de refrigeração	1	- Taxa de falha de trocador de calor é 7,37/10 ⁶ h, OREDA (2002); - A Operação da planta considerada informou que este equipamento tem elevada taxa de falha.

TABELA 4.6: ESTIMATIVA DA FREQUÊNCIA DOS EVENTOS INICIADORES

4.4. Etapa 4 - Identificar as IPL's existentes e estimar a PFD

No capítulo 2 explicamos claramente a diferença entre IPL e salvaguarda e os requisitos necessários para que uma salvaguarda possa ser considerada uma IPL. Diante destas informações foi possível definir as IPL's dos cenários.

Para os cenários I, II, III e IV do evento iniciador furo da carcaça do AF o sistema de ventilação possui um motor de 10CV, por isso será a única IPL deste cenário, já que procedimentos, em geral, não são considerados como IPL's (vide tabela 2.2). No entanto

É importante mencionar que na APP a salvaguarda relacionada aos termopares dizia estar nos cadinhos e não no topo, porém em entrevista com a operação fomos informados que só existe termopar no topo do AF e nos GLENDONS. Em ambos os casos a presença do termopar não seria relevante para os cenários estudados, pois mediriam uma variável do processo no intuito de

otimização da produção e não mitigação ou prevenção de acidentes. Sendo assim esta salvaguarda não foi considerada como IPL.

A APP não menciona a atividade que do forneiro, função esta exercida por um operador, realizada constantemente. Este funcionário está sempre presente na área do AF para acompanhar o seu funcionamento. Em caso de problema no sistema de refrigeração e no sistema de emergência automático por gravidade, o funcionário deverá utilizar uma mangueira que se encontra próxima ao AF e molhar a parte externa do AF com água, no intuito de manter a temperatura na faixa desejada. Nesse momento a produção é suspensa até o reparo do sistema de refrigeração.

Na tabela 4.7 estão os cenários e suas respectivas IPL's e salvaguardas.

Cenários	Evento iniciador	Conseqüência	IPL` s	Salvaguardas
I	Furo na carcaça do AF	Incêndio	-	<ul style="list-style-type: none"> - Existência de procedimentos prevendo as condições para o acesso às plataformas do Alto-Forno (ex: uso de carboxímetro); - Existência de procedimentos para incendiar os pequenos vazamentos de gás nas ventaneiras/timpas; - Existência de termopares para monitorar a temperatura do topo do AF;
II		Lesões pessoais	-	
III		Fatalidade	Área ventilada;	
IV		Intoxicação	Área ventilada;	
V	Ruptura da mangueira de refrigeração	Queima / explosão da ventaneira e timpa	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de refrigeração - Operador 	-
VI		Lesões pessoais	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de refrigeração - Operador 	-
VII		Danos materiais	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de refrigeração - Operador 	-
VIII		fatalidade	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de refrigeração - Operador 	-

TABELA 4.7: IPL's e salvaguardas

Depois de definidas foram estimas as PFD's das IPL's, que estão relacionadas na tabela 4.8.

IPL's	PFD	Considerações e Fontes
Sistema de Refrigeração de Emergência	4×10^{-2}	GRUND, 2001
Ventilação	$5,22 \times 10^{-2}$	IEEE, 1984
Operador	1×10^{-2}	CCPS, 2001

TABELA 4.8: Estimativa das PFD's das IPL's

4.5. Etapa 5 – Determinação da Frequência dos Cenários

Seguindo a descrição do capítulo 2 para o cálculo da frequência dos cenários, a tabela 4.9 mostra a seqüência e os valores considerados.

Cenários	Evento iniciador	Frequência (ano ⁻¹) do evento iniciador (fi)	IPL's	∏ PFD	Frequência do Cenário (fc) fc = fi * ∏ PFD
I	Furo na carcaça do AF	0,2475	-	-	0,2475
II		0,2475	-	-	0,2475
III		0,2475	- Sistema de refrigeração	$5,22 \times 10^{-2}$	$1,29 \times 10^{-2}$
IV		0,2475	- Sistema de refrigeração	$5,22 \times 10^{-2}$	$1,29 \times 10^{-2}$
V	Ruptura da mangueira de refrigeração	1	- Sistema de refrigeração - operador	4×10^{-3}	4×10^{-3}
VI		1	- Sistema de refrigeração - Operador	4×10^{-3}	4×10^{-3}
VII		1	- Sistema de refrigeração - Operador	4×10^{-3}	4×10^{-3}
VIII		1	- Sistema de refrigeração - Operador	4×10^{-3}	4×10^{-3}

TABELA 4.9: Frequência dos cenários

4.6. Etapa 6 – Estimativa do Risco

Número do Cenário	Equipamento	Título do Cenário:	
I	Alto Forno - AF	Liberação de Substância Perigosa devido a furo na carcaça do AF	
	Descrição	Probabilidade	Frequência (ano ⁻¹)
Conseqüência (Descrição/ Categoria)	Incêndio na planta categoria 2		
Evento Iniciador	Furo na carcaça do AF		0,2475
Frequência da Conseqüência não mitigada			0,2475
Camadas de Proteção Independentes - IPL's			
Salvaguardas não IPL's	1) Existência de procedimentos prevendo as condições para o acesso às plataformas do Alto-Forno (ex: uso de carboxímetro) 2) Existência de termopares para monitorar a temperatura do topo do AF; 3) Existência de procedimentos para incendiar os pequenos vazamentos de gás nas ventaneiras/timpas;		
Probabilidade Total de falha na demanda para todas as IPL's		0	
Frequência da Conseqüência mitigada			0,2475
Critério Tolerância de Risco é atendido? Opcional, deve-se avaliar alternativas de mitigação do risco.			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância:	Condições de engaiolamento (preparação de carga) devem ser evitadas, pois favorecem um superaquecimento das paredes do AF e conseqüente fragilização do material. Garantir condições para refrigeração constante da carcaça do AF com a instalação de sensores de nível no reservatório de água e a não formação de engaiolamento do AF.		
Observações:	Recomenda-se a instalação de termopares nos cadinhos, para controle da temperatura e aumento da vida útil do revestimento interno do AF.		

TABELA 4.10: Cenário I

Número do Cenário	Equipamento	Título do Cenário:	
II	Alto Forno - AF	Liberação de Substância Perigosa devido a furo na carcaça do AF	
	Descrição	Probabilidade	Freqüência (ano ⁻¹)
Conseqüência (Descrição/ Categoria)	Lesões Pessoais categoria 2		
Evento Iniciador	Furo na carcaça do AF		0,2475
Freqüência da Conseqüência não mitigada			0,2475
Camadas de Proteção Independentes - IPL's			
Salvaguardas não IPL's	1) Existência de procedimentos prevendo as condições para o acesso às plataformas do Alto-Forno (ex: uso de carboxímetro); 2) Existência de termopares para monitorar a temperatura do topo do AF; 3) Existência de procedimentos para incendiar os pequenos vazamentos de gás nas ventaneiras/timpas;		
Probabilidade Total de falha na demanda para todas as IPL's		0	
Freqüência da Conseqüência mitigada			0,2475
Critério Tolerância de Risco é atendido? Opcional, deve-se avaliar alternativas de mitigação do risco.			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância:	Condições de engaiolamento (preparação de carga) devem ser evitadas, pois favorecem um superaquecimento das paredes do AF e conseqüente fragilização do material. Garantir condições para refrigeração constante da carcaça do AF com a instalação de sensores de nível no reservatório de água e a não formação de engaiolamento do AF.		
Observações:	Recomenda-se a instalação de termopares no cadinho, para controle da temperatura e aumento da vida útil do revestimento interno do AF.		

TABELA 4.11: Cenário II

Número do Cenário	Equipamento	Título do Cenário:	
III	Alto Forno - AF	Liberação de Substância Perigosa devido a furo na carcaça do AF	
	Descrição	Probabilidade	Frequência (ano ⁻¹)
Conseqüência (Descrição/ Categoria)	Fatalidade categoria 2		
Evento Iniciador	Furo na carcaça do AF		0,2475
Frequência da Conseqüência não mitigada			0,2475
Camadas de Proteção Independentes - IPL's			
Sistema de ventilação		5,22x10 ⁻²	
Salvaguardas não IPL's	1) Existência de procedimentos prevendo as condições para o acesso às plataformas do Alto-Forno (ex: uso de carboxímetro); 2) Existência de termopares para monitorar a temperatura do topo do AF; 3) Existência de procedimentos para incendiar os pequenos vazamentos de gás nas ventaneiras/timpas;		
Probabilidade Total de falha na demanda para todas as IPL's			
Frequência da Conseqüência mitigada			1,29x10 ⁻²
Critério Tolerância de Risco é atendido? Opcional, deve-se avaliar alternativas de mitigação do risco.			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância:	Condições de engaiolamento (preparação de carga) devem ser evitadas, pois favorecem um superaquecimento das paredes do AF e conseqüente fragilização do material. Garantir condições para refrigeração constante da carcaça do AF com a instalação de sensores de nível no reservatório de água e a não formação de engaiolamento do AF.		
Observações:	Recomenda-se a instalação de termopares no cadinho, para controle da temperatura e aumento da vida útil do revestimento interno do AF.		

TABELA 4.12: Cenário III

Número do Cenário	Equipamento	Título do Cenário:	
IV	Alto Forno - AF	Liberação de Substância Perigosa devido a furo na carcaça do AF	
	Descrição	Probabilidade	Freqüência (ano ⁻¹)
Conseqüência (Descrição/ Categoria)	Intoxicação categoria 2		
Evento Iniciador	Furo na carcaça do AF		0,2475
Freqüência da Conseqüência não mitigada			0,2475
Camadas de Proteção Independentes - IPL's			
Sistema de Ventilação		5,22x10 ⁻²	
Salvaguardas não IPL's	1) Existência de procedimentos prevendo as condições para o acesso às plataformas do Alto-Forno (ex: uso de carboxímetro); 2) Existência de termopares para monitorar a temperatura do topo do AF; 3) Existência de procedimentos para incendiar os pequenos vazamentos de gás nas ventaneiras/timpas;		
Probabilidade Total de falha na demanda para todas as IPL's			
Freqüência da Conseqüência mitigada			1,29x10 ⁻²
Critério Tolerância de Risco é atendido? Opcional, deve-se avaliar alternativas de mitigação do risco.			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância:	Condições de engaiolamento (preparação de carga) devem ser evitadas, pois favorecem um superaquecimento das paredes do AF e conseqüente fragilização do material. Garantir condições para refrigeração constante da carcaça do AF com a instalação de sensores de nível no reservatório de água e a não formação de engaiolamento do AF.		
Observações:	Recomenda-se a instalação de termopares no cadinho, para controle da temperatura e aumento da vida útil do revestimento interno do AF. Assim como a instalação de dicks de contenção de material apropriado.		

TABELA 4.13: Cenário IV

Número do Cenário	Equipamento	Título do Cenário:	
V	Alto Forno - AF	Ruptura da mangueira de refrigeração	
	Descrição	Probabilidade	Freqüência (ano ⁻¹)
Conseqüência (Descrição/ Categoria)	Queima / explosão da ventaneira categoria 3		
Evento Iniciador	Ruptura da mangueira de refrigeração		1
Freqüência da Conseqüência não mitigada			1
Camadas de Proteção Independentes - IPL's			
Sistema de refrigeração de emergência		4x10 ⁻²	
Intervenção Humana		1x10 ⁻²	
Salvaguardas não IPL's			
Probabilidade Total de falha na demanda para todas as IPL's		4x10 ⁻⁴	
Freqüência da Conseqüência mitigada			4x10 ⁻⁴
Critério Tolerância de Risco é atendido? Adicionar em uma próxima oportunidade.			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância:	<p>Garantir que a caixa de água de refrigeração de emergência esteja sempre cheia.</p> <p>Colocar monitoração de nível nas caixas de água da refrigeração com alarme na área do AF e na sala de supervisório para nível mínimo.</p>		
Observações:			

TABELA 4.14: Cenário V

Número do Cenário	Equipamento	Título do Cenário:	
VI	Alto Forno - AF	Ruptura da mangueira de refrigeração	
	Descrição	Probabilidade	Frequência (ano ⁻¹)
Conseqüência (Descrição/ Categoria)	Lesões Pessoais categoria 5		
Evento Iniciador	Furo na carcaça do AF		1
Frequência da Conseqüência não mitigada			1
Camadas de Proteção Independentes - IPL's			
Sistema de refrigeração de emergência		4x10 ⁻²	
Intervenção Humana		1x10 ⁻²	
Salvaguardas não IPL's			
Probabilidade Total de falha na demanda para todas as IPL's		4x10 ⁻³	
Frequência da Conseqüência mitigada			4x10⁻³
Critério Tolerância de Risco é atendido? Ação imediata.			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância:	Garantir que a caixa de água de refrigeração de emergência esteja sempre cheia. Colocar monitoração de nível nas caixas de água da refrigeração com alarme na área do AF e na sala de supervisorio para nível mínimo.		
Observações:			

TABELA 4.15: Cenário VI

Número do Cenário	Equipamento	Título do Cenário:	
VII	Alto Forno - AF	Ruptura da mangueira de refrigeração	
	Descrição	Probabilidade	Freqüência (ano ⁻¹)
Conseqüência (Descrição/ Categoria)	Danos Materiais categoria 2		
Evento Iniciador	Furo na carcaça do AF		1
Freqüência da Conseqüência não mitigada			1
Camadas de Proteção Independentes - IPL's			
Sistema de refrigeração de emergência		4×10^{-2}	
Intervenção Humana		1×10^{-2}	
Salvaguardas não IPL's			
Probabilidade Total de falha na demanda para todas as IPL's		4×10^{-3}	
Freqüência da Conseqüência mitigada			4×10^{-3}
Critério Tolerância de Risco é atendido? Opcional.			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância:	<p>Garantir que a caixa de água de refrigeração de emergência esteja sempre cheia.</p> <p>Colocar monitoração de nível nas caixas de água da refrigeração com alarme na área do AF e na sala de supervisorio para nível mínimo.</p>		
Observações:			

TABELA 4.16: Cenário VII

Número do Cenário	Equipamento	Título do Cenário:	
VIII	Alto Forno - AF	Ruptura da mangueira de refrigeração	
	Descrição	Probabilidade	Freqüência (ano ⁻¹)
Conseqüência (Descrição/ Categoria)	Fatalidade categoria 5		
Evento Iniciador	Furo na carcaça do AF		1
Freqüência da Conseqüência não mitigada			1
Camadas de Proteção Independentes - IPL's			
Sistema de refrigeração de emergência		4×10^{-2}	
Intervenção Humana		1×10^{-2}	
Salvaguardas não IPL's			
Probabilidade Total de falha na demanda para todas as IPL's		4×10^{-4}	
Freqüência da Conseqüência mitigada			4×10^{-4}
Critério Tolerância de Risco é atendido? Ação imediata.			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância:	<p>Garantir que a caixa de água de refrigeração de emergência esteja sempre cheia.</p> <p>Colocar monitoração de nível nas caixas de água da refrigeração com alarme na área do AF e na sala de supervisorio para nível mínimo.</p>		
Observações:			

TABELA 4.17: Cenário VIII

5. CONCLUSÃO

A aplicação da LOPA no AF da usina siderúrgica indicou que esse sistema não atende aos critérios de tolerância de risco adotados neste estudo em todos os cenários. Visto que o sistema estudado envolve a operação da gusa em temperaturas elevadas, outras formas de proteção devem ser implementadas de maneira a mitigar os riscos.

Na ausência de dados relacionados a esta atividade, foi necessário, em vários momentos, consultar a gerência de operação da planta e estimar os valores das taxas de falha necessária.

Foi possível constatar, que as informações dos cenários listados na APP não reproduzia a realidade da operação, tendo em alguns momentos inserido proteções que não existiam, como o termopar no cadinho. Salva-guarda esta, que se realmente existisse na planta seria uma IPL. Além de IPL's ignoradas pelo estudo como o forneiro que acompanha todo o processo e funciona como uma IPL no caso de falha do sistema de refrigeração de emergência.

Este estudo não se aprofundou nos eventos habilitadores, por exemplo para o evento iniciador da ruptura da mangueira, poderiam ter sido investigadas suas possíveis causas como choque mecânico, entupimento, entre outros. Para obter este tipo de resposta, faz-se necessário a utilização de um método mais sofisticado como FMEA ou Árvore de Falha.

Na indisponibilidade da Análise Probabilística de Segurança, a LOPA proporciona resultados rápidos, objetivos, simplificados e válidos para a quantificação do risco dos sistemas estudados, facilitando a tomada de decisões e proporcionando certo conhecimento do impacto das medidas de proteção contra uma indisponibilidade da planta. A LOPA pode ser útil como uma abordagem prévia, não devendo ser utilizada em substituição à APS.

A LOPA identifica operações, práticas, sistemas e processos que não têm a proteção adequada e fornece base para especificação das IPL's.

A maior dificuldade encontrada na realização deste trabalho foi a determinação das freqüências de falha dos equipamentos dos eventos iniciadores e a estimativa das PFD's dos sistemas de proteção, devido à falta de informações relevantes específicas de uma usina siderúrgica e base de dados da própria empresa, visto que a planta estudada está em operação a menos de 2 anos.

Estas restrições mencionadas acima são umas das principais fontes de incerteza introduzidas nos resultados da LOPA.

Ao longo da análise, foram realizadas simplificações e comparações com equipamentos similares para compensar falta de informações. Apesar de suas limitações, seus resultados qualitativos são úteis na determinação da urgência da correção, podendo poupar tempo ao se analisar cenários mais complexos, pois tem foco na tomada de decisão.

A LOPA ainda pode ser estendida a diversas outras situações que envolvam as tomadas de decisão baseadas na informação do risco, como por exemplo, na fase de projeto, na avaliação de modificações de projeto, no planejamento de respostas de emergência, na avaliação e classificação de eventos, etc.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CCPS, *Layer of Protection Analysis, Simplified Process Risk Assessment*. American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, New York, 2001.

[2] IEEE, *ANSI/IEEE Standard 500-1984: Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, and Sensing Component Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations*, Piscataway, NJ, Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1984.

[3] OREDA, *Offshore Reliability Data Handbook*. 4th edition, SINTEF Industrial Management, Trondheim, Noruega, 2002.

[4] ALVES, C. L. *Uma Aplicação da Técnica de Análise de Camadas de Proteção (LOPA) na Avaliação de Risco de Incêndios nas Rotas de Cabos de Desligamento de um Reator Nuclear*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.