Pós-Graduação

Segurança de Processos

CONCEITO 5 INEP/ MEC

NÍVEL DE INTEGRIDADE DE SEGURANÇA (SIL) EM PROJETO DE TRANSPORTADOR DE CORREIA

Fernanda G. de Siqueira, Heliliano Guedes, Pedro A. dos S. Valezin, Roberta L. de S. Costa

RESUMO

Neste trabalho, estudou-se alguns dos perigos e riscos operacionais relacionados a transportadores de correia. Foi proposta a instalação de intertravamento por uma função instrumentada de segurança que, ao detectar carga alta no transportador, interrompe a dosagem, fechando uma válvula guilhotina. Aplicou-se o método Hazop para identificação de perigos e o método Lopa para quantificação dos riscos. No projeto da função, adotou-se as recomendações do ciclo de vida de segurança da norma IEC 61511-1, o método baseado em diagramas de blocos de confiabilidade, as fórmulas simplificadas da norma VDI/VDE 2180-4 e planilha eletrônica para cálculos. Para determinação da probabilidade de falha dos componentes, consideraram-se parâmetros tais como λ_{DU} (taxa de falhas perigosas não detectadas), arquitetura de votação e frequência de testes. A confiabilidade da função foi atingida, obtendo-se SIL1 e fator de redução de risco 40, probabilidade de falha na demanda de 2,48E-02 (0,0248) por ano.

Palavras-chave: *Transportador de Correia; SIL; Nível de Integridade de Segurança*.

ABSTRACT

In this work, some of the hazards and operational risks related to belt conveyors were studied and it was proposed to install an interlock by an instrumented safety function – which, when detecting a high load on the conveyor, it interrupts the dosage by closing a guillotine valve. The Hazop method was applied to identify hazards and the Lopa method to quantify the risks. In the function design, it was adopted the safety lifecycle of the IEC 61511-1 standard. This method based on the reliability block diagrams, the simplified formulas of the VDI/VDE 2180-4 standard and spreadsheet electronic for calculations. To determine the probability of components failure, parameters such as λDU (hazardous undetected failure rates), voting architecture and tests interval. The reliability of the function was achieved, obtaining SIL1 with a risk reduction factor 40, probability of failure on demand of 2.48E-02 (0,0248)per year.

Keywords: *Belt Conveyor; SIL; Safety Integrity Level.*

TERMOS, SIGLAS, DEFINIÇÕES E ABREVIAÇÕES

AS/NZS *Australian/New Zealand Standard* - Normas conjuntas da Austrália / Nova Zelândia

ASME *American Society of Mechanical Engineers* – Associação Americana de Engenheiros Mecânicos

BPCS *Basic Process Control System* – Sistema Básico de Controle de Processo

CCPS *Center for Chemical Process Safety* – Centro para Segurança de Processo Químico

CEMA *Conveyor Equipment Manufacturers Association* – Associação de Fabricantes de Equipamentos Transportadores

DIN *Deutsches Institut für Normung* - Instituto Alemão para Normatização

E/E/PE *Electrical/Electronic/Programmable Electronic* - Elétrico/Eletrônico/Eletrônico programável

FTA *Fault Tree Analysis* - Análise de árvore de falhas

HFT *Hardware Fault Tolerance* – Tolerância a Falha do Hardware

HAZOP *Hazard and Operability Study* – Estudo de Perigos e Operabilidade

IEC *International Electrotechnical Commission* - Comissão Eletrotécnica Internacional

IPL *Independent Protection Layer* – Camada Independente de Proteção

ISO *International Organization for Standardization* - Organização Internacional de Normalização).

LOPA *Layer Of Protection Analysis* - Análise de Camadas de Proteção

PFD *Probability of Failure on Demand* - Probabilidade de Falha na Demanda

PFD_{avg} *Probability of Failure on Demand Avarage* - Probabilidade de Falha na Demanda Média

PFH *Probability of Failure per Hour* - Probabilidade de Falha por Hora

PSV *Pressure Safety Valve* – Válvula de Segurança de Pressão

RBD *Reliability Block Diagrams* - Diagramas de blocos de confiabilidade

SIF *Safety Instrumented System* – Sistema Instrumentado de Segurança

SIL *Safety Integrity Level* – Nível de Integridade de Segurança

SIS *Safety Instrumented System* – Sistema Instrumentado de Segurança

SRS *Safety Requirement Specification* – Especificação dos Requisitos de Segurança

VDI *The Association of German Engineers* – Associação de Engenheiros Alemães

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Transportadores de correia são comumente utilizados para o transporte de materiais sólidos a granel. Ao projetar um transportador de correia, por recomendação da Associação de Fabricantes de Equipamentos Transportadores (*The Conveyor Equipment Manufacturers Association*, CEMA), normas específicas de projeto são levadas em conta, como a ANSI/CEMA B105.1, AS/NZS 4024.3611, ASME B20.1, DIN 22101e ISO 5049-1. Estas normas se concentram em determinar qual atrito que a correia será submetida durante seu funcionamento. Tal atrito depende, dentre outros fatores, do comprimento, da capacidade, da velocidade linear e do peso da correia e do diâmetro do tambor (Lodewijks e Rogova, 2014). Após o atrito ser determinado com precisão, todos os componentes principais podem ser dimensionados, incluindo a correia, os acionadores e os freios. O conjunto de normas mencionadas, portanto, fornece uma abordagem típica de um projeto.

Por outro lado, os padrões de engenharia vigentes falham em abordar duas questões importantes. A primeira questão, discutida por Lodewijks e Rogova (2014), é a dinâmica dos transportadores de correias. Para sistemas transportadores de grande escala, de alta potência ou com alta capacidade, a dinâmica durante o estado transiente do transportador é o principal aspecto a ser considerado pelo projeto. A segunda questão é que os padrões não abordam os requisitos de segurança. Embora as normas de projeto especifiquem os fatores de segurança aplicáveis às tensões da correia ao determinar a classificação da correia exigida, elas não fornecem um modo para determinar a confiabilidade, o que pode ser exigido para garantir uma parada segura do transportador. Assim, verifica-se que as normas existentes não fornecem um método para a avaliação da confiabilidade dos sistemas de segurança. Como resultado, as especificações para documentos de aquisição não tratam dos riscos toleráveis no aspecto de segurança operacional.

O projeto de arquitetura dos componentes do transportador que cumprem as funções de segurança é indispensável e, como já mencionado, as normas para transportadores de correia de materiais sólidos não abordam questões de segurança funcional com requisitos para nível de integridade de segurança (*Safety Integrity Level*, SIL).

O SIL pode ser definido como um número discreto que representa proporcionalmente o nível de redução de risco fornecido por uma função instrumentada de segurança e especifica os requisitos de integridade desta função. O estudo de criticidade da função é

guiado por normas de segurança funcionais, baseadas na norma IEC 61508 (IEC 61508-1: 2010 – Segurança funcional de sistemas elétricos/eletrônicos/eletrônicos programáveis relacionados à segurança – Parte 1: Requisitos gerais).

Este trabalho propõe um protocolo de cálculo de nível de integridade de segurança de um transportador de correia que pode ser especificado durante a etapa de projeto de um sistema e apresenta uma situação para aplicação da técnica de análises de perigos e operabilidade (*hazards and operability analysis*, HAZOP), associada a análise de camadas de proteção (*layer of protection analysis*, LOPA).

1.2. TRANSPORTADOR DE CORREIA E PERIGOS OPERACIONAIS

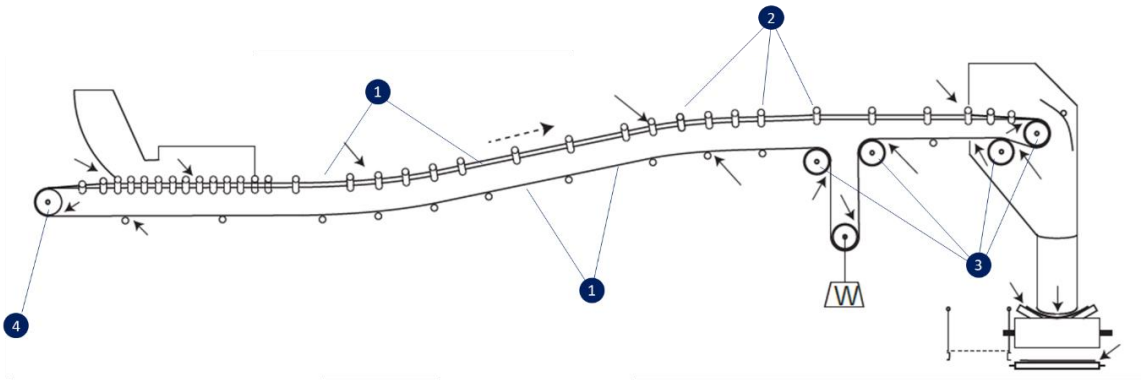
Os componentes essenciais de um transportador de correias típico são apresentados por Rao (2020) da seguinte forma:

1. A **correia**, que forma a superfície móvel e suporte na qual o material transportado é depositado. A correia não apenas transporta o material, como também interliga a tração;
2. Os **roletes**, que formam o suporte para a correia em formato côncavo para o deslocamento no sentido de ida e o deslocamento da correia em formato plano no sentido de retorno;
3. Os **tambores**, que sustentam, direcionam e controlam a correia e seu tensionamento;
4. O **acionamento**, que converte a força por meio de um ou mais tambores para mover a correia e sua carga. Tipicamente, o acionamento é fornecido através de um motor elétrico com engrenagens redutoras;
5. A **estrutura**, que suporta e mantém o alinhamento dos roletes, tambores e acionamento.

A

Figura 1 e Figura 2 ilustram estes elementos e os respectivos posicionamentos no sistema.

Figura 1: Componentes principais de um transportador de correia.



Fonte: Norma AS/NZS 4024.3611:2015

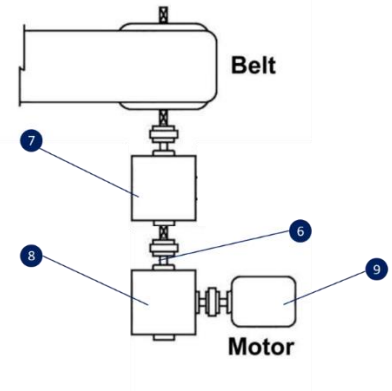
Figura 2: Estrutura parcial de um transportador de correia.

Fonte: Foundations for Conveyor Safety – Martin Engineering Company, 2016.

Além dos cinco principais componentes citados, existem diversos outros equipamentos auxiliares aplicados na operação do transportador de correia (RAO, 2020). A Figura 3 ilustra um sistema típico de acionamento e seus principais elementos:

6. **Sensores de vibração** do acionamento;
7. **Sistema de frenagem** a disco;
8. **Acoplamento e engrenagens** redutoras;
9. **Motor** elétrico.

Figura 3: Visão geral do sistema de acionamento.



Fonte: The Conveyor Belt: A Concise Basic Course, 2020.

Algumas justificativas relacionada a priorização da segurança operacional no transportador de correia são apresentadas a seguir:

— Transportadores de correia têm muitos componentes rotativos, como roletes, tambores, volantes e discos de freio que armazenam altos níveis de energia cinética e são capazes de apresar roupas humanas, cabelos e braços;

— A alta tensão mecânica aparente na correia é uma fonte de energia elástica, também chamada de energia potencial. Embora a correia seja projetada para suportar essas tensões, a ruptura de correia pode, no entanto, ocorrer. Durante esta causalidade, toda a energia potencial é liberada e faz com que a correia se comporte de forma altamente imprevisível. Se pessoas estão próximas quando a correia rompe, podem ser ocasionados acidentes graves;

— Os transportadores de correias regenerativos dependem de seu sistema de acionamento, e de freio, no que diz respeito à segurança. Se o sistema de acionamento não atuar corretamente, é necessário um freio de dimensão exageradamente grande para parar o transportador. Se o freio falhar, a correia acelera até elevadas velocidades, levando a outras situações perigosas como, por exemplo, sobrecarga nos chutes de transferência ou recebimento (chutes são equipamentos que cumprem a função de pulmão entre a saída e a entrada de equipamentos de transportes).

A Tabela 1 apresenta um resumo de dados de fatalidades em mineração entre janeiro de 1993 e dezembro de 2012. A pesquisa foi levantada com o objetivo de identificar eventos perigosos relacionados à segurança de processo (não contabilizando eventos envolvendo segurança ocupacional como lesões por contato em partes móveis).

Tabela 1: Acidentes operacionais em transportadores de correia.

%	QTD.	DESCRIÇÃO
37%	10	Liberação de energia descontrolada por perda no controle da coreia
30%	8	Queda de materiais
19%	5	Falha estrutural catastrófica
7%	2	Operação de equipamento inadequada
4%	1	Queima por vapor de material aquecido derramado
4%	1	Eletrocussão

Fonte: Norma AS/NZS 4024.3611:2015

Para Gelais (2016) Na maioria dos casos, o perigo está relacionado à perda no controle da correia. Esta perda ocorre quando não mais é possível estabelecer um nível de controle seguro do tensionamento e da velocidade da correia, podendo ocorrer projeções do material que está sendo transportado, levando a perda de contenção e liberação de energia descontrolada. Um exemplo é o rompimento transversal da correia apresentada na Figura 4, nas letras a, b e c. Este tipo de evento leva a consequências desastrosas ao meio ambiente, às pessoas e ao próprio equipamento.

Figura 4: Exemplos de eventos operacionais envolvendo rompimento transversal da correia.

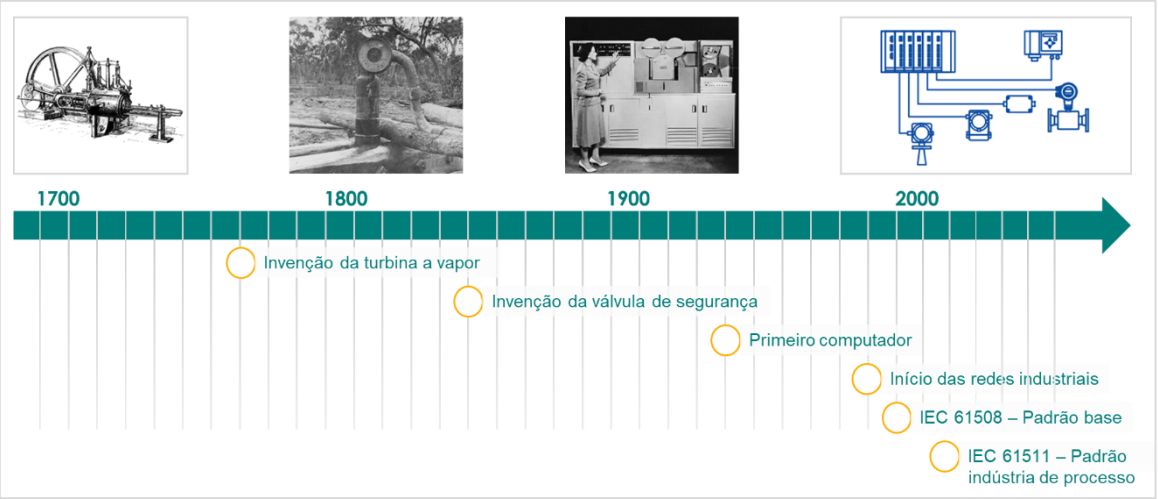
(a) (b) (c)

Fonte: Google Imagens, 2021

1.3. CONCEITOS DE SEGURANÇA FUNCIONAL

Baum, Bode e Lafos (2015) apresenta um breve resumo do desenvolvimento histórico da segurança funcional na indústria mundial, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Desenvolvimento histórico da segurança funcional.

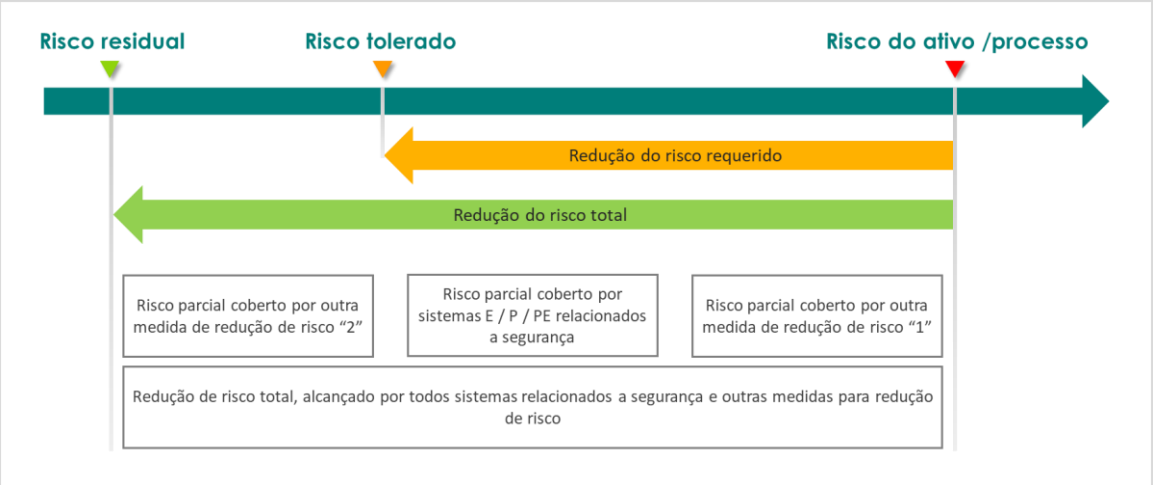


Fonte: Adaptado da academia KROHNE (2015)

De maneira resumida, a segunda metade do século 18 viu o início das máquinas sendo usadas para manufatura de produtos. O uso industrial de turbinas a vapor ocasionou grande aumento de explosões e acidentes fatais. Segundo Baum, Bode e Lafos (2015) Iniciou-se, assim, o monitoramento de variáveis de processos (como pressão de vapor) e a busca de dispositivos de proteção. No ano de 1852, a primeira válvula de segurança de pressão (PSV) foi apresentada. Até o início da automação industrial (em torno de 1940), equipes monitoravam variáveis de processo enquanto operavam suas plantas. Já no século 20, como resultado de novos desenvolvimentos da engenharia, controles industriais foram desenvolvidos e grandes centros de controle operacional foram implementados. A tecnologia das primeiras redes industriais nasceu em 1985 e, dado em parte a experiências negativas com falha de *softwares*, a primeira versão da norma IEC 61508 foi publicada como sendo o primeiro padrão internacional para sistemas eletrônicos em 1998.

Segurança funcional é, por definição, a parcela da segurança total de um equipamento, ou processo, sob controle que depende do correto funcionamento de um sistema elétrico, eletrônico, eletrônico programável (E/E/PE) relacionados à segurança do processo e outras medidas adotadas para a redução do risco, como descrito pela norma IEC 61508-5 e ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Redução de risco – conceitos gerais.



Fonte: Adaptado da norma IEC 61508-5 (2010)

Em relação à segurança funcional para indústria de processo, a primeira versão da norma IEC 61511, foi publicada em 2003 e trouxe requisitos que serão discutidos mais adiante.

1.4. CICLO DE VIDA DE SEGURANÇA DO SIS

Na indústria de processos químicos, sistemas instrumentados de segurança (*Safety Instrumented System*, SIS) são tipicamente implementados para assegurar que hidrocarbonetos ou energias perigosas sejam contidas, assim como para manter em controle os processos e operações críticos, garantindo dessa forma que os instrumentos, resolvedores de lógica e elementos finais aplicados na segurança funcional estejam íntegros.

A missão dos sistemas instrumentados de segurança é prevenir, ou mitigar, danos físicos a pessoas, instalações e meio ambiente em eventos que levem a condições perigosas ou em caso de falha do sistema básico de controle de processo (*Basic Process Control System, BPCS).* Assim, um estado seguro é assegurado pelo SIS. Não obstante, no caso de evento de falha no SIS, é esperado que o próprio SIS conduza o processo a um estado considerado como condição de falha segura (*fail-safe*). Como exemplo, na situação de falha, uma válvula de controle que se movimenta para posição falha aberta ou falha fechada dependendo do projeto do SIS (Gabriel, 2017).

A complexidade e ampla variedade de indústrias do setor de processo (como química, óleo e gás, papel e celulose, farmacêutica, alimentos e bebidas, geração de energia), gera a necessidade de estudos de HAZOP e LOPA para endereçar os requisitos de segurança funcional e as respectivas categorias SIL para cada função instrumentada de segurança (*safety instrumented function*, SIF*).*

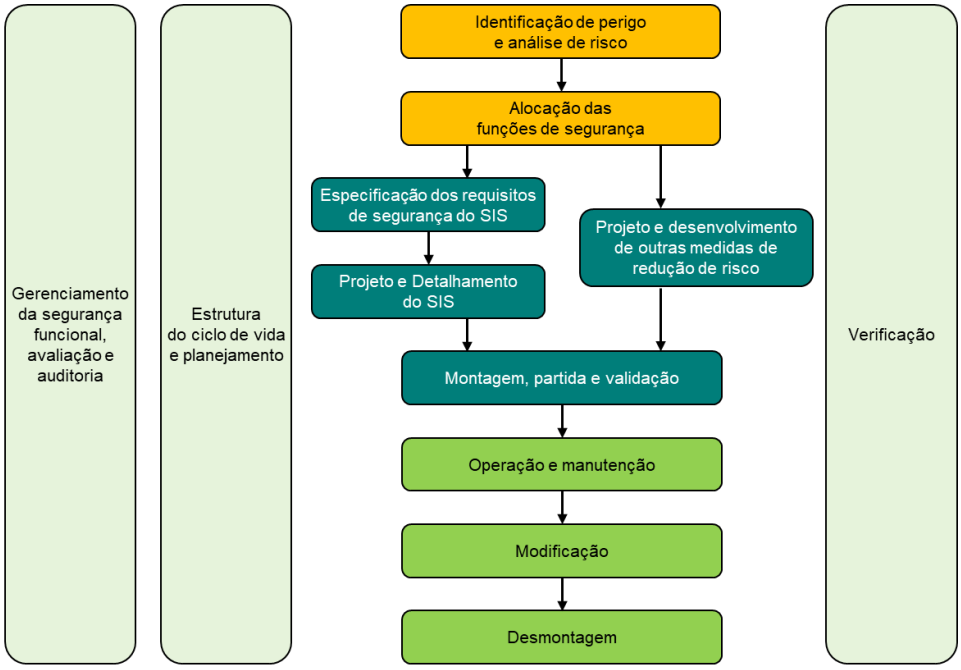
Na Figura 7, são apresentadas as etapas do ciclo de vida de segurança do SIS. Observa-se que os requisitos do ciclo de vida de segurança são definidos com o planejamento estruturado das atividades (IEC 61511-1, 2016). Cada etapa possui objetivos distintos e produzem conteúdos que suprem a entrada da etapa subsequente.

Por exemplo, a etapa de identificação de perigos e análise de riscos tem como objetivos determinar:

1. Os eventos perigosos e equipamentos associados;
2. A cadeia de eventos que levam ao cenário de risco;
3. Os perigos do processo associados ao cenário de risco;
4. Os requisitos para redução de riscos;
5. As funções instrumentadas de segurança necessárias para alcançar o risco tolerável.

Após a identificação de perigos e análise de riscos, a etapa de alocação das funções de segurança irá descrever e associar o SIL de cada SIF que foi alocada como uma camada de proteção, e assim por diante.

Figura 7: Etapas do ciclo de vida de segurança do SIS.



Fonte: Adaptado da norma IEC 61511-1 (2016)

2. METODOLOGIA

2.1. HAZOP E LOPA

O estudo de perigo e operabilidade (HAZOP) pode ser definido como um procedimento de avaliação de perigo baseado em cenário em que uma equipe usa uma série de palavras-guia para identificar possíveis desvios de um determinado projeto ou trecho de um processo e, em seguida, examina as consequências potenciais desses desvios e a adequação de salvaguardas existentes (Johnson, 2010).

SUMMERS (2003) indica que a análise LOPA é uma abordagem semiquantitativa que avalia um cenário de acidente (par causa-consequência) por vez, usando valores predefinidos para a frequência da causa inicial, probabilidade de falha da camada de proteção independente (*Independent Protection Layer*, IPL) e gravidade da consequência. O objetivo é comparar a ordem de grandeza do risco dos cenários acidentais com a dos riscos definidos como toleráveis para, então, determinar onde a redução de risco é necessária. Em outras palavras, determinar se as camadas de proteção presentes contra um cenário acidental são suficientes para reduzir a sua frequência de ocorrência a um nível previamente acordado como tolerável. Analisando a LOPA em um ponto de vista mais técnico, sua atuação seria na comparação da ordem de grandeza entre a frequência da consequência e a frequência tolerável. Os cenários de acidente devem ser identificados em uma metodologia complementar, normalmente usando um procedimento de avaliação de perigo baseado em cenário, como um estudo HAZOP.

Ao combinar as duas metodologias descritas anteriormente, a técnica resultante tira proveito dos pontos fortes de ambos os métodos e mitiga os pontos fracos de cada um (CCPS, 2008). Combinar um estudo HAZOP baseado em cenário com LOPA permite que uma equipe devidamente treinada faça um estudo HAZOP para identificar os cenários e, em seguida, conduza um LOPA sobre um subconjunto dos cenários HAZOP. O CCPS (2008) indica que qualquer método qualitativo de avaliação de risco que identifique cenários em termos de suas causas iniciais, sequências de eventos, consequências e salvaguardas pode ser prontamente estendido para um estudo LOPA, sempre que a equipe considerar um cenário que exija tal análise. Os métodos de estudo HAZOP são, portanto, bem adequados para combinação com LOPA (SUMMERS, 2003).

Um conceito chave que vale ser destacado é que, para um estudo HAZOP ser estendido a um estudo HAZOP/LOPA é que este deve ser estruturado e registrado na planilha final para a avaliação cada par de causa-consequência para os desvios pertinentes ao sistema.

Os estudos HAZOP que empregam uma abordagem desvio por desvio que listam todas as causas possíveis, todas as consequências possíveis e todas as salvaguardas possíveis para cada desvio não são passíveis de serem estendidos ao HAZOP/LOPA.

Outro ponto é que a LOPA não deve ser aplicada a todos os cenários sendo, em geral, aplicada àqueles que levam à perda de contenção. No entanto, cabe a cada empresa que adota esta metodologia definir um critério para identificar os cenários de HAZOP que precisam ser avaliados com a LOPA, com base em seus próprios critérios e parâmetros de risco. É de responsabilidade também da empresa a definição do critério de tolerabilidade do risco.

Ao final da análise HAZOP/LOPA, caso o nível de segurança alcançado não seja suficiente, será necessário dimensionar salvaguardas adicionais. As camadas independentes de proteção (IPL), são salvaguardas que efetivamente contribuem para diminuir o risco de um cenário e podem ser definidas como aquelas que mantém sua função preventiva ou mitigatória de forma autônoma, não obstante a falha de qualquer outra camada de proteção (HARRINGTON, 2009). De forma geral e simplificada, para ser considerada uma IPL, a salvaguarda precisa atender requisitos de efetividade, independência e auditoria.

Salienta-se que antes de se considerar a adição de camadas de proteção, recomenda-se buscar aplicar soluções de projeto inerentemente mais seguras. Em suma, pode-se adotar a seguinte ordem para inclusão de novas camadas de proteção (CCPS, 2001):

1) Projeto inerentemente mais seguro;
2) IPLs preventivas passivas;
3) IPLs preventivas ativas que não sejam Funções Instrumentadas de Segurança (SIF);
4) SIFs;
5) IPLs mitigadoras.

A eficácia de um sistema instrumentado de segurança (SIS) em trazer uma operação perigosa a um estado seguro é expressa em termos de níveis de integridade de segurança (SIL), com probabilidades de falha sob demanda (PFD) listadas na

Tabela 2.

Tabela 2: Nível de integridade de Segurança (SIL).

Nível de Integridade de Segurança	MODO DE BAIXA DEMANDA		MODO CONTÍNUO OU ALTA DEMANDA
	Probabilidade Média de Baixa Demanda (PFD_{avg}) / ativação	Fator de Redução de Riscos RRF (1/PFD)	Probabilidade Média de Falha por Hora (PFH) / Hora
SIL 4	$\geq 10^{-5}$ a $< 10^{-4}$	>10.000 a ≤ 100.000	$\geq 10^{-9}$ a $< 10^{-8}$
SIL 3	$\geq 10^{-4}$ a $< 10^{-3}$	>1.000 a ≤ 10.000	$\geq 10^{-8}$ a $< 10^{-7}$
SIL 2	$\geq 10^{-3}$ a $< 10^{-2}$	>100 a ≤ 1.000	$\geq 10^{-7}$ a $< 10^{-6}$
SIL 1	$\geq 10^{-2}$ a $< 10^{-1}$	>10 a ≤ 100	$\geq 10^{-6}$ a $< 10^{-5}$

Fonte: IEC 61511-1, 2016

A IEC-61511-1 define o valor SIL como um indicador discreto da disponibilidade de uma função instrumentada de segurança, apresentado em uma escala de números inteiros de 1 a 4. A indústria comumente usa o SIL para ser equivalente à grandeza da redução de risco, usando conservadoramente o limite inferior da faixa de redução de risco alvo.

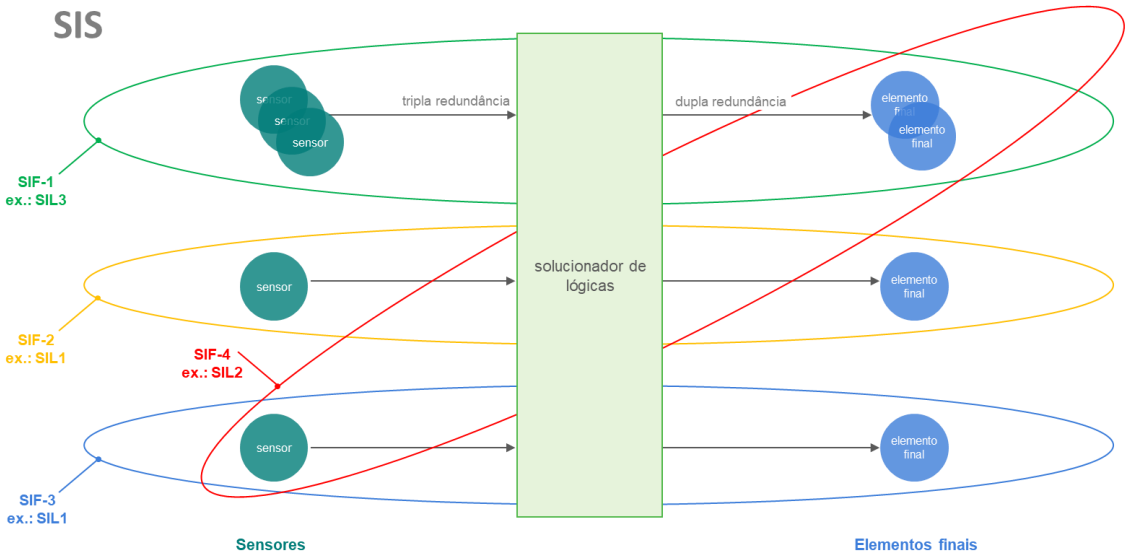
Considerando os valores SIL como escala de grandeza de redução de risco, permite-se que eles sejam especificados junto com a avaliação de riscos, baseando-se nos cenários utilizados para a adequação das salvaguardas existentes. Se o SIL já estiver especificado para uma determinada função instrumentada de segurança, ele pode ser aplicado diretamente como a magnitude de redução de risco para a salvaguarda determinada pela análise dos cenários selecionados do HAZOP em uma base de ordem de grandeza (Johson, 2010).

2.2. CÁLCULO DE CONFIABILIDADE

De acordo com a norma IEC 61511-1, a SIF é uma função automática que atua como camada de proteção em relação a eventos perigosos, com objetivo de manter ou levar o processo a um estado seguro, por meio de ações predefinidas com um nível de integridade requerido (SIL requerido). A norma também define que SIS é um sistema de segurança utilizado para implementar uma ou mais funções instrumentadas de segurança e tipicamente é composto de qualquer combinação de sensor(es), unidade(s) solucionador(es) de lógica e elemento(s) final(is).

Múltiplas SIFs podem ser implementadas em um único SIS. No entanto, cada função deve estar alocada como sendo uma camada de proteção para determinado evento perigoso. O SIL deve ser determinado para cada SIF, conforme ilustrado pela Figura 8.

Figura 8: Composição típica de um SIS.



Fonte: adaptado de IEC 61511-1 (2016)

Uma vez definido o SIL requerido para cada função instrumentada de segurança que foi alocada como camada de proteção para o evento perigoso, então deve ser definida a especificação dos requisitos de segurança (*Safety Requirement Specification*, SRS) para o SIS que irá executá-la.

A documentação completa de SRS normalmente é composta de diversos documentos quem contém as especificações dos requisitos mínimos de segurança para cada SIF, de forma a possibilitar o desenvolvimento do projeto e detalhamento. Os principais itens que devem ser cobertos são: lógica funcional de cada SIF, lista de entradas e saídas de cada SIF, descrição do estado seguro do processo, o intervalo de testes de cada elemento da SIF, o SIL requerido de cada SIF, dentre outras.

O projeto de uma função instrumentada de segurança a ser implementado por meio do SIS inclui o conjunto de sensores, solucionador de lógicas, elementos finais e o cálculo do SIL atingido para cada SIF (que dever ser maior ou igual ao SIL requerido). Dado que a SIF pode ser consistida por múltiplos sensores com mais do que um elemento final ou qualquer outra com possível (ver Figura 4), a confiabilidade desta será obtida através de cálculos que levam em conta as taxas de falha destes elementos (SLAG, ARIAN. 2016).

A IEC 61511-1 impõe restrição sobre a arquitetura do sistema. A principal restrição é chamada de "Tolerância a Falha do Hardware" (*Hardware Fault Tolerance*, HFT*)*. Isto significa que o sistema de segurança deve ainda estar funcional quando este contém uma ou mais falhas detectadas. Para todos os sistemas, a tolerância a falha mínima depende somente do SIL requerido da SIF, conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3: HFT mínimo requerido de acordo com o SIL e modo de operação.

SIL	MODO DE OPERAÇÃO	MÍNIMO HFT REQUERIDO
1	Qualquer modo	0
2	Baixa demanda	0
2	Demanda contínua	1
3	Alta demanda ou demanda contínua	1
4	Qualquer modo	2

Fonte: adaptado da IEC 61511-1 (2016)

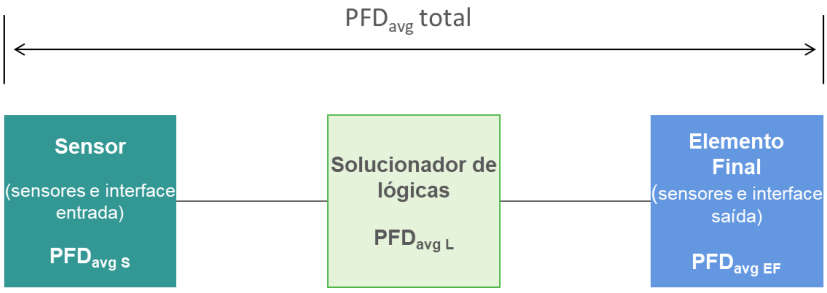
Com a definição da arquitetura e os elementos da função, o projeto quantifica a probabilidade de falha de cada SIF, que deve ser igual ou menor do que o valor da probabilidade de falha relacionada ao SIL requerido, conforme especificado na SRS. Diversos métodos de cálculo são propostos (ver norma IEC 61508-6: 2010). Os principais métodos são: Diagramas de blocos de confiabilidade (*Reliability Block Diagrams*, RBD), Análise de árvore de falhas (*fault-tree analysis*, FTA) e Modelos de Markov.

Este trabalho considerou a utilização do método de cálculo baseado em RDB com fórmulas simplificadas dado sua praticidade sem necessidade do uso de Software de cálculo especialista. Adicionalmente, também foi considerado função operando em modo baixa demanda.

Probabilidade de falha sob demanda média é a probabilidade de que um sistema falhe perigosamente e não seja capaz de executar sua função de segurança quando necessário. O PFD pode ser determinado como uma probabilidade média ou probabilidade máxima ao longo de um período de tempo. IEC 61508/61511 e ISA 84.01 usam PFD_{avg} como a métrica do sistema na qual o SIL é definido. O PFD_{avg} (PFD médio) é um número adimensional sem relação com o tempo. O valor PFD_{avg} pode ser ilustrado da seguinte maneira: Com um PFD_{avg} de 10^{-3}, uma falha da SIF em uma a cada 1.000 demandas em média, o que significa que se o valor de desarme for alcançado, a SIF não executará a ação de segurança desejada (por exemplo, um desligamento), neste caso, tem-se uma falha perigosa.

Para uma SIF, o PFD_{avg} é composto pelas probabilidades de falhas dos sensores, da lógica de processamento e do elemento final. Assim, o PFD_{avg} de uma SIF é dado como a soma do PFD_{avg} de cada bloco, conforme representação RDB ilustrada pela Figura 9 e apresentada na Equação (1).

Figura 9: Diagrama de Blocos de Confiabilidade da SIF.



Fonte: Adaptado da IEC 61508-6 (2010)

$$PFD_{avg}\ total = PFD_{avg\ S} + PFD_{avg\ L} + PFD_{avg\ EF} \quad \text{(Eq. 1)}$$

Onde:

$PFD_{avg}\ total$ = Probabilidade de Falha na Demanda Média Total.

$PFD_{avg\ S}$ = Probabilidade de Falha na Demanda Média (sensores e interface entrada).

$PFD_{avg\ L}$ = Probabilidade de Falha na Demanda Média (Solucionador de lógica).

$PFD_{avg\ EF}$ = Probabilidade de Falha na Demanda Média (Elemento final).

Para o cálculo de cada PFD_{avg}, consideram-se as fórmulas simplificadas apresentadas na Tabela 4 e são necessários os parâmetros λ_{DU} (taxa de falhas perigosas não detectadas) e T (intervalo de testes).

Tabela 4: Fórmulas de aproximação simplificadas para cálculo da PFD_{avg}.

Arquitetura de Votação	**Descrição**	**PFD_{avg}**
1oo1	1 de 1 elemento detecta a demanda	$\frac{1}{2} . \lambda_{DU} . T$
1oo2	1 de 2 elementos detecta a demanda	$\frac{1}{3} . \lambda DU^2 . T^2 + \beta . \lambda DU . \frac{1}{2} . T$
1oo3	1 de 3 elementos detecta a demanda	$\frac{1}{4} . \lambda DU^3 . T^3 + \beta . \lambda DU . \frac{1}{2} . T$
2oo2	2 de 2 elementos detectam a demanda	$\lambda_{DU} . T$
2oo3	2 de 3 elementos detectam a demanda	$\lambda DU^2 . T^2 + \beta . \lambda DU . \frac{1}{2} . T$

Fonte: VDI/VDE 2180 Parte 4 (2021)

Na intenção de incrementar a integridade de um bloco, os dispositivos algumas vezes são “votados”. Significa que, por exemplo, na arquitetura de votação 1oo2 no sensor, a função instrumentada de segurança irá atuar se um de dois sensores detectarem uma demanda. Portanto, ela ainda atuará se um dos dispositivos entrar em falha (perigosa não detectada). Para levar completamente a configuração da arquitetura a falhar, ambos os sensores devem falhar ao mesmo tempo. A fórmula simplificada neste caso é apresentada na Equação (2).

$$PFD_{avg\ 1oo2} = \frac{1}{3} \cdot \lambda_{DU}{}^{2} \cdot T^{2} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. DESCRITIVO DO SISTEMA

O sistema avaliado neste trabalho é baseado em uma instalação hipotética que consiste em um transportador de correia que tem por objetivo a movimentação de carvão entre o silo e a caldeira aquatubular que gera vapor utilizado no processo de uma planta petroquímica. O transportador de correias tem quinhentos metros de extensão total e dois metros de largura, sendo capaz de transportar até 50 toneladas de carvão por hora.

A taxa de alimentação do transportador de correias é proporcional a velocidade de movimentação da mesma, sendo a malha de controle composta por um medidor de velocidade conectado ao eixo do rolo de tração por contato fornecendo um sinal de 4 a 20mA a um controlador lógico programável que, por sua vez, controla a abertura de uma válvula do tipo borboleta. A velocidade de movimentação do transportador de correias é controlada com base na necessidade de combustível na caldeira, pelo operador dela por meio de uma interface homem-máquina localizada próxima ao equipamento.

O carvão transportado é baseado no carvão disponível na Jazida de Chico Lomã, sendo classificado na categoria de "Carvão Betuminoso de Alto Volátil C" da classificação ASTM, com poder refletor das vitrinitas entre 0,6% e 0,7%. Apresenta porcentagem de cinzas variando entre 12% a 22% e Poder Calorífico Superior em Base Seca (PCSBS) de 6.800 a 6.000 cal/g. (Serviço Geológico Brasileiro, 1997). O carvão também é classificado como pulverizado tendo granulometria variando entre 0,05 e 0,15 mm, permitindo assim aumento do rendimento da fornalha, redução da formação de NOx e possibilidade de projeto de caldeiras de grande porte (Both J., 2012).

O fluxograma mostrado na

Figura 10 representa o trecho do sistema avaliado nesse trabalho e a malha de controle existente.

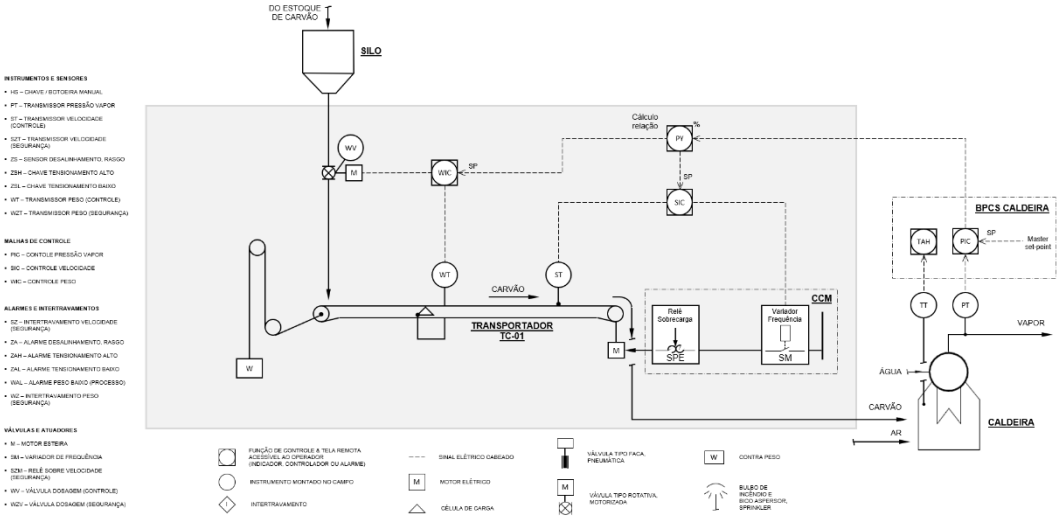


Figura 10: Sistema avaliado.

Fonte: autores

Com base nas características do carvão, a inflamabilidade e explosividade foram avaliadas de acordo com as informações fornecidas pelo Institut für Auslandsbeziehungen (Instituto de Saúde e Segurança Ocupacional Alemão), conforme Tabela 5.

Tabela 5: Características do carvão.

Variável	Valor
Mediana da granulometria [µm]	1150
Sobrepressão máxima gerada [bar]	7,8
K_{st} [bar*m/s]	54
Explosividade	St 1

Fonte: Adaptado de Institut für Auslandsbeziehungen (2021).

Outra característica importante do carvão para o correto dimensionamento e operação de sistemas industriais é a sua capacidade de adsorção como CO, CO_2, SO e NO que uma vez combinados com a umidade atmosférica podem formar compostos ácidos e, portanto, corrosivo para estruturas metálicas (Gentil. 2011 *apud* CAGLIARI et. al. 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. HAZOP

A técnica HAZOP foi implementada no nó do processo descrito na Figura 10. A planilha com os resultados é apresentada no

Anexo 1, assim como a matriz de risco utilizada para classificar os riscos a pessoas, instalação e produção e meio ambiente.

Os seguintes parâmetros foram avaliados: temperatura maior, temperatura menor, pressão maior, fluxo nenhum, fluxo menor, fluxo maior, fluxo reverso, contaminação, carga maior, carga menor e carga nenhuma.

A Tabela 6 apresenta os pares causas-consequências avaliados como riscos não toleráveis.

Tabela 6: Pares causa-consequência com riscos não toleráveis.

	Parâmetro	Causa	Consequência	Risco Não Tolerável
1	Temperatura Maior	Rolete travado, gerando aumento de temperatura por atrito com a correia de látex.	Ignição do carvão, levando a incêndio.	Instalação e Produção
2	Fluxo Maior	Falha da malha de controle da velocidade do transportador de correia levando aumento da velocidade.	Aumento de tensão mecânica na correia levando ao rompimento, com liberação abrupta de energia potencial elástica podendo atingir pessoas e estruturas.	Pessoas, Instalação e Produção
3	Fluxo Maior	Falha da malha de controle da carga do transportador de correia levando a aumento da carga.	Aumento de tensão mecânica na correia levando ao rompimento, com liberação abrupta de energia potencial elástica podendo atingir pessoas e estruturas.	Pessoas, Instalação e Produção

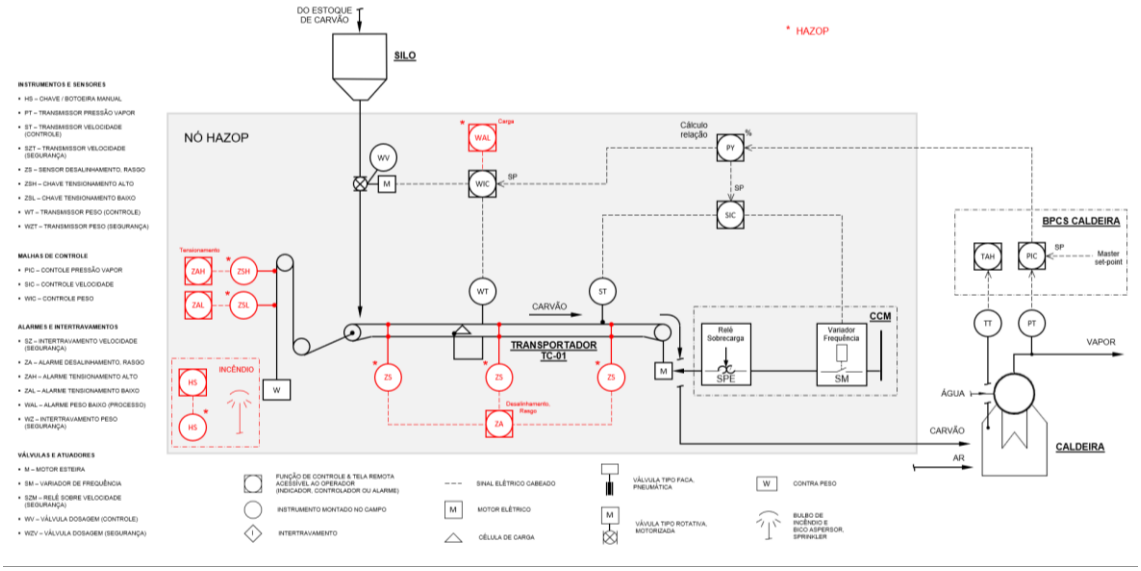
A partir de algumas recomendações do Hazop, a malha de controle do trecho analisado foi incrementada. O resultado é apresentado na

Os pares causa-consequência da Tabela 6 foram selecionados para o LOPA para a continuidade da análise.

Figura 11.

Os pares causa-consequência da Tabela 6 foram selecionados para o LOPA para a continuidade da análise.

Figura 11: Malha do sistema com recomendações do HAZOP.



Fonte: autores

4.2. LOPA

A análise mais detalhada do primeiro par causa consequência na LOPA resulta em um risco à instalação não tolerável, com um fator de redução de risco requerido de 2500. Lista-se, então, a salvaguarda sugerida (sistema de detecção de incêndio e dilúvio), que é uma IPL de redução de risco 10. Com a redução, o fator de redução de risco requerido para a instalação é 250 e, então, sugere-se a elaboração de estudos adicionais de vulnerabilidade para avaliar a propagação da nuvem de fumaça e radiação no transportador de correia de forma a entender a possível aplicação de detectores de fumaça e fogo que possam ser utilizados em sistemas instrumentados de segurança.

O segundo par causa consequência possui riscos intoleráveis para pessoas e instalação. As IPLs sugeridas (resposta do operador ao alarme de sobretensão mecânica, malha de controle e resposta do operador ao alarme de temperatura alta) possuem fator de redução de risco total de 1000, levando o gap para 2,5, tolerável e 2,5. Assim, dado o valor inferior a 10, não é necessário um sistema instrumentado de segurança e sugere-se a instalação de intertravamento no controle de velocidade que, ao detectar o aumento de velocidade da correia, faça o desligamento do motor (RRF $\geq$ 2,5).

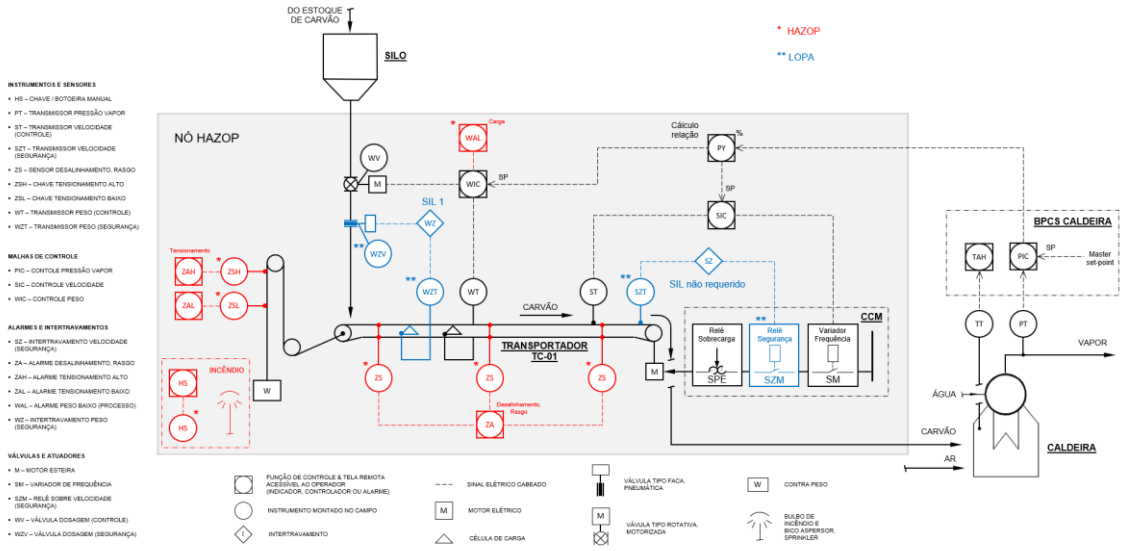
O terceiro par causa consequência resulta em riscos intoleráveis para pessoas e instalação. As IPLs sugeridas (malha de controle e resposta do operador ao alarme de sobretensão mecânica) fornecem um RRF de 100, levando o gap RRF de meio ambiente para a zona do tolerável e o de pessoas e instalação para 25. Assim, sugere-se a instalação de

intertravamento no controle de carga que, ao detectar o aumento de carga da correia, faça o desligamento do motor. Esta função instrumentada (FIS-01) será arquitetada nos próximos tópicos.

A planilha completa que demonstra as premissas, definições e resultados da LOPA está no Anexo 2.

O fluxograma com as adaptações sugeridas pela análise LOPA está representado na Figura 12.

Figura 12: Malha de controle após análise LOPA.



Fonte: autores

4.3. CONFIABILIDADE DA SIF DO TRANSPORTADOR DE CORREIA

Este capítulo apresenta os resultados da análise para a Função Instrumentada de Segurança FIS-01 - Carga muito alta de carvão no Transportador TC-01.

4.3.1. Informações Gerais

A Função Instrumentada de Segurança é identificada por:

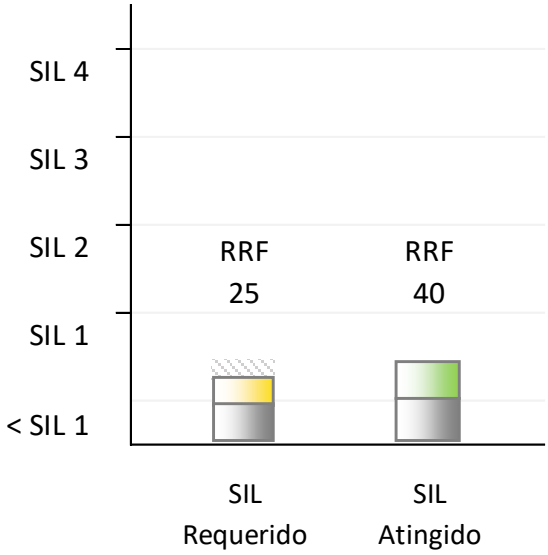
Nome da SIF	Carga muito alta de carvão no Transportador TC-01.
Tag da SIF	FIS-01.
Descrição da SIF	Intertravamento por carga muito alta de carvão no sensor WZT-01, atuando no fechamento da válvula WZV-01.
Referência da SIF	Conforme recomendação da análise HAZOP/LOPA dos itens anteriores.
Perigo	Falha da malha de controle “WIC” de dosagem do transportador (PFD 1 x 10^{-1}/ano, CCPS Lopa, Pág. 71 Tabela 5.1, Falha em malha de controle BPCS).

Consequência	Pessoas e Ativos: aumento de tensão mecânica na correia, podendo levá-la ao rompimento e liberação abrupta de energia potencial elástica, com alcance as pessoas e as estruturas.

4.3.2. Nível de Integridade de Segurança Requerido e Alcançado

O Nível de Integridade de Segurança requerido que se deseja atingir por esta Função Instrumentada de Segurança é SIL 1 com RRF > 25. A verificação do SIL concluiu que o Nível de Integridade de Segurança atingido por esta Função Instrumentada de Segurança foi SIL 1 com RRF = 40, conforme ilustrado na Figura 13.

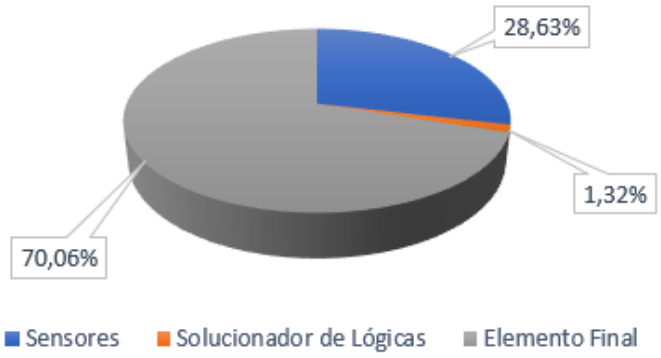
Figura 13: SIL Requerido versus SIL Atingido.



Fonte: Fonte: memória de cálculo, autores

O tempo de missão e testes foi de 72 meses, fator beta 10% para redundância idêntica e 5% para diversa ($\boldsymbol{\beta}$ é o fator de falha de modo comum). O desempenho da função é mostrado também na Figura 14 . A SIF opera em modo de baixa demanda. A capabilidade sistemática da função não foi considerada, apenas os requisitos quantitativos da IEC 61511.

Figura 14: Contribuição do PFD_{avg} por elemento.



Fonte: memória de cálculo, autores

4.3.3. Verificação de SIL

Esta seção fornece uma visão detalhada da verificação do Nível de Integridade de Segurança realizado para a Função Instrumentada de Segurança FIS-01 - Carga muito alta de carvão no Transportador TC-01. De forma a realizar a parte dos cálculos de confiabilidade da verificação do Nível de Integridade de Segurança, são definidas as seguintes premissas:

Tempo de Missão 72 meses (paradas periódicas da planta)

Fator b 10% (redundância idêntica) e 5% (redundância diversa)

Intervalo de Teste 72 meses

A SIF opera em modo de Baixa demanda

A capabilidade sistemática dos diversos componentes da Função Instrumentada de Segurança FIS-01 não foi considerada. Consequentemente, a verificação de SIL realizada apenas aborda os requisitos quantitativos da IEC 61511.

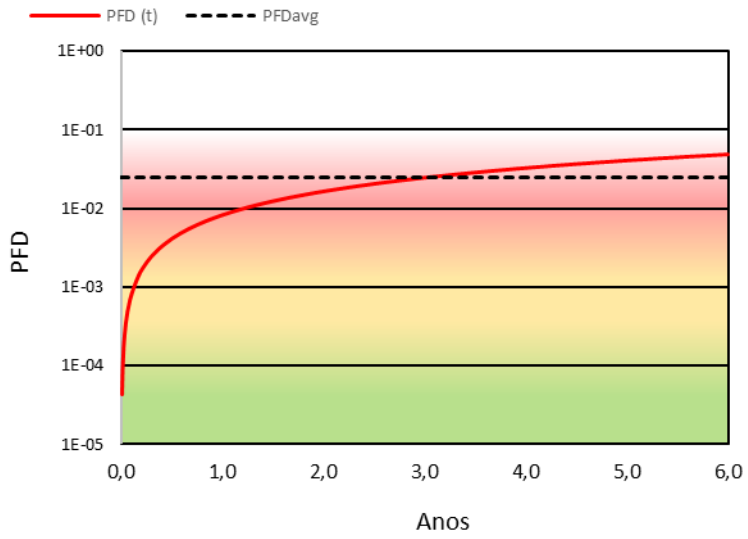
A partir dos dados de confiabilidade e dos detalhes dos cálculos descritos nas próximas subseções deste capítulo, a Função Instrumentada de Segurança FIS-atinge o desempenho de segurança funcional mostrado na Tabela 7 e Figura 15.

Tabela 7: Desempenho de Segurança Funcional

(PFD_{avg})	**RRF** ($1/PFD_{avg}$)	**SIL** (PFD_{avg})	**SIL** (Restrições da Arquitetura IEC 61508)
2,48E-02	40	1	2

Fonte: memória de cálculo, autores

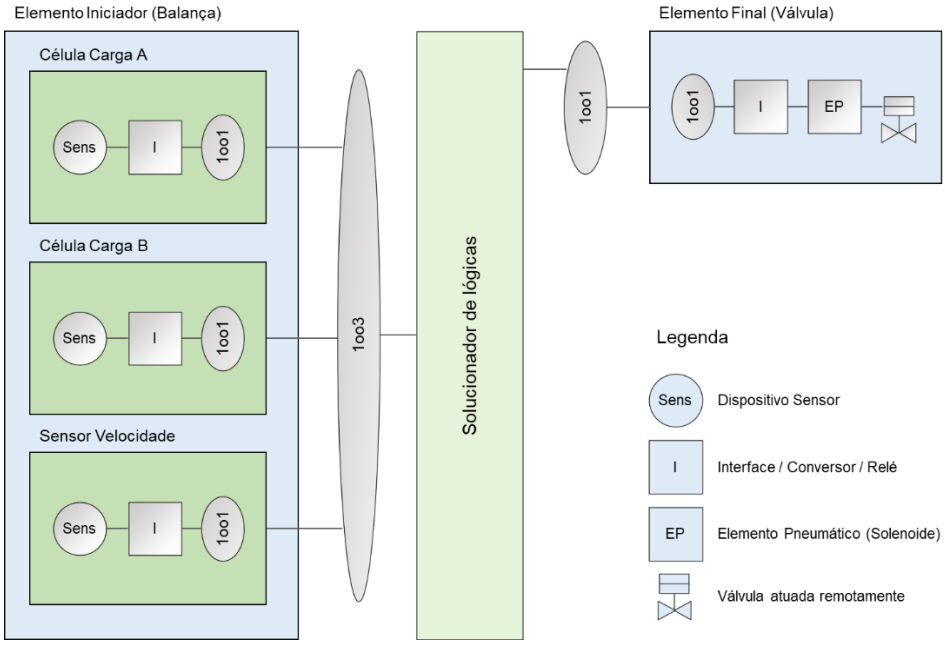
Figura 14 Desempenho de Segurança Funcional.



Fonte: memória de cálculo, autores

O Projeto Conceitual da SIF foi modelado como mostrado na Figura 16.

Figura 16: Arquitetura da SIF.



Fonte: memória de cálculo, autores

4.3.3.1. Configuração do Bloco Elemento Iniciador (Balança)

A Função Instrumentada de Segurança FIS-01 - Carga muito alta de carvão no Transportador TC-01 da parte do Sensor consiste de 3 Blocos de Sensores. Dois blocos

referem-se a **Células de Carga (A e B)**, o outro refere-se ao **Sensor de Velocidade**. A votação entre Blocos Sensores é 1oo3.

A Função Instrumentada de Segurança FIS-01 - Carga muito alta de carvão no Transportador TC-01 da parte do Elemento Iniciador (Balança) é quantificada da seguinte forma:

PFD_{avg} do bloco Sensor 7,09E-3

HFT do bloco Sensor 0

As Restrições de Arquitetura (IEC 61508) parte do Sensor permitem usar até SIL 2.

A Tabela 8 mostra os dados de confiabilidade usados durante a verificação do Nível de Integridade de Segurança do Bloco Elemento Iniciador (Balança).

Tabela 8: Dados de Confiabilidade do Bloco Elemento Iniciador (Balança).

	Componente	Qt.	λ_{DU} [FIT]	λ_{DU} [1/h]	Tipo de Arquitetura	Capabilidade Sistemática
1	Sub-bloco Célula de Carga (A)	1	1056,960	1,06E-06	B (Rota 1H)	SIL 2
2	Sub-bloco Célula de Carga (B)	1	1056,960	1,06E-06	B (Rota 1H)	SIL 2
3	Sub-bloco Sensor de Velocidade	1	37,310	3,73E-08	A (Rota 1H)	SIL 2
	TAXA DE FALHA λ_{DU} TOTAL		**2149,23**	**2,15E-06**		

Fonte: memória de cálculo, autores.

*FIT = 1 falha / 10^9 horas	1,00E09
T = intervalo de teste (anos)	6
T = intervalo de teste (meses)	72
$PFD_{avg\ 1oo3}\ (balança) = \frac{1}{4}\ {\lambda_{DU}}^3 . T^3 + \beta . \lambda_{DU} + \frac{1}{2}\ T$	$7{,}09.10^{-3}$

4.3.3.1.1. Sub bloco Células de Carga (A e B)

As informações e dados de confiabilidade abaixo descrevem as Células de Carga (A e B) como foi analisado na verificação do Nível de Integridade de Segurança.

Votação dentro do bloco 1oo2

HFT	1
Dispositivos (cada)	2 Células de Carga (A e B)
	2 Amplificadores / Conversores de Sinal para Célula de Carga
Fator β	10 [%]
Intervalo de Teste	72 meses

A Tabela 9 mostra os dados de confiabilidade usados durante a verificação do Nível de Integridade de Segurança do Sub-bloco Células de Carga (A e B).

Tabela 9: Dados de Confiabilidade do Sub-bloco Células de Carga (A e B).

	Componente	Qt.	λ_{DU} [FIT]	λ_{DU} [1/h]	Tipo de Arquitetura	Capabilidade Sistemática
1	Células de Carga (A e B) (BLH Nobel KISD-D-6)	2	480,000	9,60E-07	B (Rota 1H)	SIL 2
2	Conversor / isolador de célula de carga (G.M. International D5264S)	1	47,980	9,60E-08	B (Rota 2H)	SIL 3
	TAXA DE FALHA λ_{DU} TOTAL		**1055,96**	**1,06E-06**		

Fonte: memória de cálculo, autores.

*FIT = 1 falha / 10^9 horas	1,00E09
T = intervalo de teste (anos)	6
T = intervalo de teste (meses)	72
$PFD_{avg\ 1oo2}\ células\ carga = \frac{1}{3}\ {\lambda_{DU}}^2 . T^2 + \beta . \lambda_{DU} + \frac{1}{2}\ T$	$3{,}80E-03$

4.3.3.1.2. Sub bloco Sensor de Velocidade

As informações e dados de confiabilidade abaixo descrevem o Bloco Sensor de Velocidade como foi analisado na verificação do Nível de Integridade de Segurança.

Votação dentro do bloco	1oo1
HFT	0
Dispositivos (cada)	Sensor de Velocidade
	Amplificador / Conversor de Sinal
Fator β	-- [%]
Intervalo de Teste	72 meses

A Tabela 10 mostra os dados de confiabilidade usados durante a verificação do Nível de Integridade de Segurança do Bloco Sensor de Velocidade.

Tabela 10: Dados de Confiabilidade do Bloco Sensor de Velocidade.

	Componente	Qt.	λ_{DU} [FIT]	λ_{DU} [1/h]	Tipo de Arquitetura	Capabilidade Sistemática
1	Sensor de velocidade Siemens SITRANS WS300 (Sensor indutivo	1	6,910	6,91E-09	B (Rota 1H)	SIL 2

	Pepper+Fuchs NJ0.8-5GM-N-5M)					
2	Amplificador de inversor indutivo (Pepper+Fuchs KFD2-SOT3-Ex 1.LB)	1	30,400	3,04E-08	B (Rota 2H)	SIL 2
	TAXA DE FALHA λ_{DU} TOTAL		**37,31**	**3,73E-08**		

Fonte: memória de cálculo, autores

*FIT = 1 falha / 10^9 horas	1,00E09
T = intervalo de teste (anos)	6
$PFD_{avg\ 1oo1\ sensor\ de\ velocidade} = \frac{1}{2}\ {\lambda_{DU}}^2.T^2 + \beta.\lambda_{DU} + \frac{1}{2}\ T$	$9{,}81E-04$

4.3.3.2. Configuração do Bloco Solucionador de Lógicas

A função instrumentada de segurança da parte do solucionador de lógicas na Função Instrumentada de Segurança FIS-01 - Carga muito alta de carvão no Transportador TC-01 é quantificada da seguinte forma:

Nome do Solucionador de Lógicas	CLP de Segurança
Equipamento	Emerson DeltaV SIS Redundant SLS
PFD_{avg} da parte do Solucionador de Lógicas	3,26E-4
HFT da parte do Solucionador de Lógicas	0
Intervalo de Teste	72 meses

As Restrições de Arquitetura (IEC 61508) parte do Solucionador de Lógicas permitem usar até SIL 3.

A Tabela 11 mostra os dados de confiabilidade usados durante a verificação do Nível de Integridade de Segurança do Bloco Solucionador de Lógicas CLP de Segurança, como foi analisado na verificação do Nível de Integridade de Segurança.

Tabela 11: Dados de Confiabilidade do Bloco Solucionador de Lógicas CLP de Segurança.

	Componente	**Qt.**	**λ_{DU} [FIT]**	**λ_{DU} [1/h]**	**Tipo de Arquitetura**	**Capabilidade Sistemática**
1	Processador Principal	1	6,000	6,00E-09	B (Rota 2H)	SIL 3
2	Fonte de Alimentação	1	6,370	6,37E-09	A (Rota 2H)	SIL 3
3	Canal de Entrada Analógica	5	0,008	2,40E-11	B (Rota 2H)	SIL 3
4	Canal de Saída Digital	1	0,000	0,00E+00	B (Rota 2H)	SIL 3
	TAXA DE FALHA λ_{DU} TOTAL		**12,410**	**1,24E-08**		

Fonte: autores.

*FIT = 1 falha / 10^9 horas 1,00E09

T = intervalo de teste (anos)	6
$PFD_{avg\ 1oo1}\ solucionadorlógica = \frac{1}{2}\ {\lambda_{DU}}^2 . T^2 + \beta . \lambda_{DU} + \frac{1}{2}\ T$	$3{,}26E-04$

4.3.3.3. Configuração do Bloco Elemento Final

A função instrumentada de segurança da parte do elemento final na Função Instrumentada de Segurança FIS-01 – Carga muito alta de carvão no Transportador TC-01 é quantificada da seguinte forma:

Votação dentro do bloco	1oo1
Dispositivos (cada)	Relé Interface Válvula Solenoide (Pepperl + Fuchs)
	Válvula Solenoide (Asco)
	Atuador Pneumático (DeZurick)
	Válvula Guilhotina (DeZurick)
Fator β	-- [%]
Intervalo de Teste	72 meses
PFD_{avg} da parte do Elemento Final	1,74E-2
HFT da parte do Elemento Final	0

As Restrições de Arquitetura (IEC 61508) parte do Elemento Final permitem usar até SIL 3.

A Tabela 12 mostra os dados de confiabilidade usados durante a verificação do Nível de Integridade de Segurança do Bloco Elemento Final WZV-01, como foi analisado na verificação do Nível de Integridade de Segurança.

Tabela 12: Dados de Confiabilidade do Bloco Elemento Final WZV-01.

	Componente	**λ_{DU} [FIT]**	**λ_{DU} [1/h]**	**Tipo de Arquitetura**	**Capabilidade Sistemática**
1	Interface Solenoide Driver (Pepperl+Fuchs KFD2-SL2-(Ex)1.LK.	10,25	1,03E-08	A (Rota 2_H)	SIL 3
2	Válvula Solenoide (ASCO Series 327, 327B3***, DTT [2014.1.02])	188,00	1,03E-08	A (Rota 2_H)	SIL 3
3	Válvula Solenoide (ASCO Series 327, 327B3***, DTT [2014.1.02])	246,00	2,46E-07	A (Rota 2_H)	SIL 3
4	Válvula Solenoide (ASCO Series 327, 327B3***, DTT [2014.1.02])	216,00	2,46E-07	A (Rota 2_H)	SIL 3
	TAXA DE FALHA λ_{DU} TOTAL	**12,410**	**1,24E-08**		

Fonte: autores.

*FIT = 1 falha / 10^9 horas	1,00E09
T = intervalo de teste (anos)	6

$$PFD_{avg\ 1oo1}\ (Elemento\ final) = \frac{1}{2}\ {\lambda_{DU}}^2.T^2 + \beta.\lambda_{DU} + \frac{1}{2}\ T \qquad 1{,}74E-02$$

A seguir, é apresentada uma discussão geral sobre a aplicação em transportadores de correia.

4.4. DISCUSSÃO GERAL SOBRE A APLICAÇÃO EM TRANSPORTADORES DE CORREIA

Durante a revisão literária, filtrando-se apenas setores industriais da siderurgia e mineração, evidenciou-se a ausência de artigos relacionados a aplicação das metodologias Hazop e Lopa para alocação de barreiras instrumentadas de segurança com requisitos SIL. Assim, não foi possível traçar uma linha comparativa dos resultados deste trabalho com outros nas bases consultadas.

Do ponto de vista comparativo entre outros setores, como as indústrias de processo, os resultados alcançados mostraram-se animadores. Como exemplo, a contribuição no PFD_{avg} total da SIF para cada componente (70% para o elemento final, 29% para o bloco sensor e 1% para o solucionador lógico), são similares aos encontrados na indústria de processo.

Dessa forma, incentiva-se que novos estudos sejam desenvolvidos, incluindo-se a aplicação do conceito de segurança funcional em projetos. Espera-se com que os objetivos de redução de riscos de processos sejam alcançados.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, obteve-se o êxito na aplicação dos métodos Hazop para identificação de perigos e o método Lopa para quantificação dos riscos e alocação da função de segurança para interrupção de dosagem em caso de carga muito alta de carvão no transportador. A confiabilidade atingida após o estudo e cálculos obteve SIL1 com desempenho superior ao requerido para o fator de redução de riscos (redução de risco requerida ≥ 25, redução de risco obtida 40).

As definições propostas pela norma IEC-61511 para o ciclo de vida de segurança foram eficientes para o desenvolvimento e verificação de SIL da função instrumentada na fase de projeto do transportador de correia.

Conclui-se que as técnicas já difundidas no setor das indústrias de processo podem ser aplicadas aos setores de siderurgia e mineração, assegurando que os perigos sejam identificados, compreendidos e controlados.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na análise mais detalhada do primeiro par causa consequência na LOPA, cuja causa é o rolete travado e o efeito é a ignição do carvão, levando a incêndio, sugere-se a elaboração de estudos adicionais de vulnerabilidade para avaliar a propagação da nuvem de fumaça e radiação no transportador de correia de forma a entender a possível aplicação de detectores de fumaça e fogo que possam ser utilizados em sistemas instrumentados de segurança. Adicionalmente, sugere-se avaliar a possibilidade da implementação de intertravamento para desligamento do motor elétrico da esteira em caso de sobrecorrente causada pelo travamento do rolete, aplicando este sistema em sistema instrumentado de segurança.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todas as pessoas que contribuíram para o nosso aprendizado, aos nossos familiares, amigos, professores e a Instituição SENAI que foram extremante importantes nesta caminhada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AS/NZS 4024.3610, 2015: Safety of machinery Part 3611: Conveyors - General requirements.

AS/NZS 4024.3611, 2015: Safety of machinery Part 3611: Conveyors - Belt conveyors for bulk materials handling

ASCO Assessment Report Exida ASC 09/04-59 R001 FMEDA / ASC 09/04-59 R003 IEC 508 Series 327/8327G Solenoid Valves

BLH NOBEL Certificate TÜV No. 968/FSP 1462.00/17 – Load Cell KISD-6 Functional Safety Certificate

CAGLIARI, Anderson; VARGAS, Nayana; RODRIGUES, Luciana. **Corrosiveness of Brazilian Candiota Coal**, Revista Matéria, v. 20, n. 4, p. 832 - 839, 2015.

CCPS, 2001: Layer of Protection Analysis. Simplified Process Risk Assessment, Outubro 2001.

CCPS, 2008: Guidelines for hazard evaluation procedures (3rd ed.). New York: American Institute of Chemical Engineers – Center for Chemical Process Safety

DeZurik Certificate Exida No. DEZ 1406094 C002 – Cast Stainless Stell Knife Gate Valves

DeZurik Certificate Exida No. DEZ 1406094 C004 – Cylinder Actuator for Knife Gate Valves

Emerson DeltaV Safety Instrumented System TÜV Certification Report No. 701-023/2003T – Safety Manual D800027X012

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011

G.M. International Certificate TÜV Table No. T-IS-722160171 – Load Cell Bridge Isolating Converter Safety Manual

GABRIEL A. **Design and Evaluation of Safety Instrumented Systems: A Simplified and Enhanced Approach**, IEEE Access, vol. 5, pages 3813-3823, 2017, doi:

10.1109/ACCESS.2017.2679023. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7873320. Acesso em: 17 ago. 2021

GELAIS, M. A. **Cálculo dinâmico de transportadores de correia - uma análise comparativa ao cálculo estático corroborada por medições de campo**. 2016. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte-MG, 2016

HARRINGTON, Kenneth H.; THOMAS, Harold W.; KADRI, Shakeel. **Using measured performance as a process safety leading indicator.** *Process Safety Progress*, v. 28, n. 2, p. 195-199, 2009.

HE, D.; PANG, Y.; LODEWIJKS G.; LIU, X. **Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials, Powder Technology**, Volume 327, 2018, Pages 408-419, ISSN 0032-5910. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.002. Acesso em: 13 ago. 2021

IEC 61508-1: 2010 – Segurança funcional de sistemas elétricos/eletrônicos/eletrônicos programáveis relacionados à segurança – Parte 1: Requisitos gerais

IEC 61508-5: 2010 – Segurança funcional de sistemas elétricos/eletrônicos/eletrônicos programáveis relacionados à segurança – Parte 5: Exemplos de métodos para determinação de níveis de integridade de segurança

IEC 61511-1: 2016 – Sistemas instrumentados de segurança para o setor da indústria de processo – Parte 1: Estrutura, definições, sistema, hardware e requisitos de programação da aplicação

IEC 61511-3: 2016 – Segurança Funcional – Sistemas instrumentados de segurança para o setor da indústria de processo - Parte 3: Diretrizes para a determinação de níveis de integridade de segurança requerido

Institut für Auslandsbeziehungen, GESTIS-DUST-EX database produto código 195, https://staubex.ifa.dguv.de/explokomp.aspx?nr=2195&lang=e, acessado em 17/10/2021.

ISA, 2005: **Safety Instrumented Systems Verification: Practical Probabilistic Calculations**. ISBN 1-55617-909-X – The Instrumentation, Systems and Automation Society

JOHNSON, ROBERT W: **Beyond-compliance uses of HAZOP/LOPA studies, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Fevereiro 2010**. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423010000501. Acesso em: 10 set. 2010

LEEMIS, L. M. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. New Jersey: Prentice-Hall, 1995

LODEWIJKS, G.; ROGOVA, E. **Safety integrity level requirements in the design of belt conveyors, SafeCon Conference 2014, Johannesburg, South Africa, 2014.** Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270574085. Acesso em: 18 jul. 2021

Martin Engineering Company: **Foundations for Conveyor Safety. 2016**. Disponível em: www.martin-eng.com. Acesso em 02 dez. 2021

P. Baum; J. Bode; A. Lafos. KROHNE Academy Online learning platform: Functional safety (SIL) in the process industry, module 1: Introduction Functional Safety in the process industry, 2015. Disponível em: https://academy-online.krohne.com/elearning/en/. Acesso em: 07 mai. 2021

Pepperl + Fuchs Functional Safety Manual - Switch Amplifier KFD2-SOT3-Ex

Pepperl + Fuchs SIL Manufacture's Declaration – Functional Safety of Inductive Sensor NJ0,8-5GM-N-5M; PF20CERT1624F

Pepperl + Fuchs Solenoid Driver KFD2-SL2-(EX) – Safety Manual SIL

Phoenix Contact Power Supply Certificate TÜV No. 968/FSP 1768.00/19 – Overvoltage protection circuitry implemented in QUINT4-PS/1AC/24DC/20

RAO, D.V.S. **The Conveyor Belt: A Concise Basic Course**. 2020. London, UK: Taylor & Francis Group, ISBN: 9780367535704, publicado em 28 set. 2020

SLAG, A.: **Functional Safety for Engineers**, Yokogawa Europe B.V. Jun. 2016

SUMMERS, Angela E. **Introduction to layers of protection analysis**. Journal of Hazardous Materials, v. 104, n. 1, p. 163-168, 2003.

SVENDBORG BRAKES: **Advanced Braking Technologies for Mining Conveyors, Engineering & Mining Journal**, October 2015

VDI 2180 PARTE 4: 2021 – Functional safety in the process industry – Mechanical components in safety instrumented systems

Anexo 1 – HAZOP

Matriz de tolerabilidade de riscos do HAZOP

Matriz de tolerabilidade de riscos							Categorias de Frequência				
			Descrição / Características				A Extremamente Remota	B Remota	C Pouco Provável	D Provável	E Frequente
			Segurança Pessoal	Patrimônio / Continuidade Operacional	Meio Ambiente	Imagem	Conceitualmente possível, mas sem referências na indústria	Não esperado ocorrer, apesar de haver referências em instalações similares na indústria	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil de um conjunto de unidades similares	Possível de ocorrer uma vez durante a vida útil da instalação	Possível de ocorrer muitas vezes durante a vida útil da instalação
Categorias de severidade das consequências	V	Catastrófica	Múltiplas fatalidades intramuros ou fatalidade extramuros	Danos catastróficos, podendo levar à perda da instalação industrial	Danos catastróficos	Repercussão internacional	M	M	NT	NT	NT
	IV	Crítica	Fatalidade intramuros ou lesões graves extramuros	Danos severos a sistemas (reparação lenta)	Danos severos	Repercussão nacional	T	M	M	NT	NT
	III	Média	Lesões graves intramuros ou lesões leves extramuros	Danos moderados a sistemas	Danos moderados	Repercussão regional	T	T	M	M	NT
	II	Marginal	Lesões leves intramuros	Danos leves a sistemas / equipamentos	Danos leves	Repercussão local	T	T	T	M	M
	I	Desprezível	Sem lesões ou no máximo casos de primeiros socorros	Danos leves a equipamentos sem compro-metimento da continuidade operacional	Danos insignificantes	Repercussão insignificante	T	T	T	T	M

HAZOP

Unidade:	Unidade XPTO - RS
Sistema:	Sistema de geração de vapor
Subsistema:	Transportador de correia de carvão de alimentação da caldeira
Sistema:	

DESVIO	POSSÍVEIS CAUSAS	POSSÍVEIS EFEITOS	Detecções / Salvaguardas	Freq.	Pessoas		Instalação e produção		Meio ambiente		Reputação		Recomendações / Observações
					Sev.	Risco	Sev.	Risco	Sev.	Risco	Sev.	Risco	
Temperatura Maior	Rolete travado, gerando aumento de temperatura por atrito com a correia de látex.	Ignição do carvão, levando a incêndio.	Visual; (D) Olfativo; (D) Sistema de combate a incêndio (botoeira manual, sistema de sprinkler com acionamento por alta temperatura, hidrante e brigada de incêndio treinada) (S)	D	II	M	IV	NT	II	M	III	M	R1 - Estabelecer uma rotina de inspeção dos roletes; R2 - Garantir que o projeto de engenharia do sistema de combate a incêndios tenha capacidade de extinguir o incêndio com base na carga de incêndio dos materiais que serão transportados.
Temperatura Maior	Acumulo de poeira combustível sobre a superfície do motor.	Ignição do carvão, levando a incêndio.	Visual; (D) Olfativo; (D) Sistema de combate a incêndio (botoeira manual, sistema de sprinkler com acionamento por alta temperatura, hidrante e brigada de incêndio treinada) (S) Rotina de *house keeping* da unidade. (S)	B	II	T	IV	M	II	T	III	T	R2 - Garantir que o projeto de engenharia do sistema de combate a incêndios tenha capacidade de extinguir o incêndio com base na carga de incêndio dos materiais que serão transportados; R3 - Estabelecer um procedimento de limpeza dos equipamentos, garantindo que não haja acumulo de poeiras combustíveis em superfícies aquecidas; R4 - Avaliar a necessidade de implementar um motor adequado a classificação de área, implementando o equipamento adequado.

Temperatura Maior	Acumulo de energia estática ignizando o material inflamável.	Ignição do carvão, levando a incêndio.	Visual; (D) Olfativo; (D) Sistema de aterramento do transportador de correia; (S) Sistema de combate a incêndio (botoeira manual, sistema de sprinkler com acionamento por alta temperatura, hidrante e brigada de incêndio treinada) (S)	C	II	T	IV	M	II	T	III	M	
Temperatura Menor	Desvio não aplicável												
Pressão Maior	Desvio não aplicável												
Pressão Menor	Desvio não aplicável												
Fluxo Nenhum	Falha da malha de controle da velocidade do transportador de correia levando a parada do equipamento.	Acumulo de carvão na extremidade de recebimento da correia levando a parada da válvula rotativa, deixando de alimentar a caldeira.	Controle de carga da correia (D); Alarme de carga alta; (D); Visual (D); Atuação do operador da caldeira (S).	D	I	T	II	M	I	T	I	T	R5 - Ter um motor sobressalente.
Fluxo Nenhum	Falha da malha de controle de carga do transportador de correia levando a parada do equipamento.	Correia operando sem material, deixando de alimentar a caldeira.	Controle de carga da correia (D); Visual (D); Atuação do operador da caldeira (S).	D	I	T	II	M	I	T	I	T	R6 - Incluir em projeto um alarme de carga baixa.
Fluxo Nenhum	Rasgo longitudinal total levando a desalinhamento na correia.	Perda de capacidade de contenção do material sobre a superfície na correia, levando a perda de material, deixando de alimentar a caldeira.	-	C	I	T	III	M	I	T	I	T	R7 - Incluir em projeto malha de detecção de desalinhamento.
Fluxo Nenhum	Perda de capacidade de atuação do sistema de tensionamento.	Perda do tensionamento da correia levando a parada no transporte de material.	-	B	I	T	II	T	I	T	I	T	

Fluxo Nenhum	Falha do sistema de tensionamento com o aumento na tensão e rompimento da correia.	Aumento de tensão mecânica na correia levando ao rompimento, com liberação abrupta de energia potencial elástica podendo atingir pessoas e estruturas.	-	C	IV	M	IV	M	I	T	II	T	
Fluxo Menor	Falha da malha de controle da velocidade do transportador de correia levando a redução da alimentação da caldeira.	Redução da taxa de alimentação da caldeira.	Controle de carga da correia (D); Visual (D); Atuação do operador da caldeira (S).	D	I	T	II	M	I	T	I	T	
Fluxo Menor	Falha da malha de controle da carga do transportador de correia levando a redução da alimentação da caldeira.	Redução da taxa de alimentação da caldeira.	Visual (D); Atuação do operador da caldeira (S).	D	I	T	II	M	I	T	I	T	
Fluxo Menor	Rasgo longitudinal parcial na correia.	Redução da taxa de alimentação da caldeira.	-	D	I	T	II	M	I	T	I	T	R8 - Incluir em projeto malha de detecção de rasgo.
Fluxo Menor	Desalinhamento da correia.	Perda de material pela lateral do transportador.	-	D	I	T	II	M	I	T	I	T	R7 - Incluir em projeto malha de detecção de desalinhamento.
Fluxo Maior	Falha da malha de controle da velocidade do transportador de correia levando aumento da velocidade.	Aumento de tensão mecânica na correia levando ao rompimento, com liberação abrupta de energia potencial elástica podendo atingir pessoas e estruturas.	Visual (D); Malha de controle de carga (D); Atuação do operador da caldeira (S).	D	IV	NT	IV	NT	I	T	II	M	O1 - A ser avaliado em detalhe utilizando a técnica de LOPA.
Fluxo Maior	Falha da malha de controle da carga do transportador de correia levando a aumento da carga.	Aumento de tensão mecânica na correia levando ao rompimento, com liberação abrupta de energia potencial elástica podendo atingir pessoas e estruturas.	-	D	IV	NT	IV	NT	I	T	II	M	O1 - A ser avaliado em detalhe utilizando a técnica de LOPA. R8 - Inserir um sensor de tensionamento e alarme de alto.
Fluxo Reverso	Falha na montagem do equipamento (ligação invertida).	Sem consequências esperadas uma vez que esta causa seria detectada durante a fase de partida do equipamento.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Contaminação	Contaminação do carvão por minérios não removidos.	Aumento de material não queimado no fundo da caldeira.	Teste de qualidade do material recebido (D); Atuação do operador da caldeira (D); Limpeza do fundo do forno.	D	I	T	I	T	I	T	I	T	
Carga maior	Já avaliado no desvio fluxo maior.												
Carga menor	Já avaliado no desvio fluxo menor.												
Carga nenhum	Já avaliado no desvio fluxo nenhum.												

Anexo 2 – LOPA

Desvios	Avaliação da Frequência		Possíveis Efeitos	Severid. Conseq.			RRF Requerido			Modos de Detecção / Salvaguardas	IPL	RRF	RRF Total	RRF Gap			Nº Rec	Recomendações / Observações
	Possíveis Causas	Freq.		S	E	A	S	E	A					S	E	A		
Temperatura Maior	Rolete travado, gerando aumento de temperatura por atrito com a correia de látex.	4	Ignição do carvão, levando a incêndio.	2	2	4	25	25	2500	Detecção visual da fumaça (D)			10	2,5	2,5	250	-	O1 - Entende-se que como o operador não faz rondas ao longo de toda a extensão do transportador de correias e esta fica fora da linha de visão e, portanto, não é possível considera-lo como uma IPL.
										Sistema de combate a incêndio (botoeira manual e sistema automático de sprinkler com acionamento por bulbo devido a alta temperatura, hidrante e brigada de incêndio treinada) (S)	Sistema de detecção de incêndio e diluvio.	10					-	O2 - Visto que a inspeção não possui frequência contínua e regular e, portanto, não é possível considera-la como uma IPL.
																	1	Elaborar estudos adicionais de vulnerabilidade para avaliar a propagação da nuvem de fumaça e radiação no transportador de correia de forma a entender a possível aplicação de detectores de fumaça e fogo que possam ser utilizados em sistemas instrumentados de segurança.
																	-	
Fluxo Maior	Falha da malha de controle da velocidade do transportador de correia levando aumento da velocidade.	4	Aumento de tensão mecânica na correia levando ao rompimento, com liberação abrupta de energia potencial elástica podendo atingir pessoas e estruturas.	4	1	4	2500	2,5	2500	Atuação do sensor de tensão mecânica na correia levando ao alarme para o operador.	Resposta do operador ao alarme de sobretensão mecânica.	10	1000	2,5	TR	2,5		O3 - Entende-se que o transportador de correias esta fica fora da linha de visão e, portanto, não é possível considerar a atuação do operador como uma IPL.
										Ação da malha de controle de pressão reduzindo a taxa de alimentação de carvão, e consequentemente reduzindo a carga. (S)	Malha de controle (BPCS)	10					2	Instalação de intertravamento no controle de velocidade, que ao detectar o aumento de velocidade da correia faça o desligamento do motor (RRF ≥ 2,5)
										Atuação do operador da caldeira (S)	Resposta do operador ao alarme de temperatura alta.	10						O4 - Os BPCSs da caldeira e do transportador de correias são independentes.
	Falha da malha de controle da carga do transportador de correia levando a aumento da carga.	4	Aumento de tensão mecânica na correia levando ao rompimento, com liberação abrupta de energia potencial elástica podendo	4	1	4	2500	2,5	2500	Sistema de proteção elétrica do motor desarmando o mesmo em caso de um aumento de corrente elétrica que é causado pelo aumento de torque do motor em decorrência do aumento de carga sobre a correia.	Malha de controle (BPCS)	10	100	25	TR	25		O3 - Entende-se que o transportador de correias esta fica fora da linha de visão e, portanto, não é possível considerar a atuação do operador como uma IPL.

			atingir pessoas e estruturas.						Atuação do sensor de tensão mecânica na correia levando ao alarme para o operador.	Resposta do operador ao alarme de sobretensão mecânica.	10					3	Instalação de intertravamento no controle de carga, que ao detectar o aumento de carga da correia faça o desligamento do motor (RRF ≥ 25)