



Análise HAZOP orientada por grafos

**Gabriel Ferreira Motta de Souza
Lucas Caetano Vivoni da Silva**

Projeto de Final de Curso

Orientadores

**Kese Pontes Freitas Alberton, DSc.
André Luis Alberton, DSc.**

Março de 2022

Análise HAZOP orientada por grafos

Gabriel Ferreira Motta de Souza

Lucas Caetano Vivoni da Silva

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Química.

Aprovado por:

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Marco Antônio Gaya de Figueiredo, D.Sc.

Hugo Gomes D'Amato Villardi, DSc.

Orientado por:

Kese Pontes Freitas Alberton, D.Sc.

Andre Luis Alberton, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Março de 2022

Ficha catalográfica

De Souza, Gabriel Ferreira Motta e Da Silva, Lucas Caetano Vivoni.

Análise HAZOP orientada por grafos/Gabriel Ferreira Motta de Souza e Lucas Caetano Vivoni da Silva. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2022.

ix, p.44; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2022.

Orientadores: Kese Pontes Freitas Alberton e André Luís Alberton.

1. HAZOP. 2. Grafos. 3. Eventos inconsistentes. 4. Monografia (Graduação – UFRJ/EQ) 5. Kese Pontes Freitas Alberton e André Luis Alberton. I. Análise HAZOP orientada por grafos.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, sem Ele nada seríamos, pois em muitos momentos a fé nos sustentou. Deus foi nosso companheiro nessa estrada cheia de obstáculos e segurou nossas mãos nesses momentos de dificuldade, obrigado por toda força que nos deste.

Aos nossos pais, por toda paciência e cumplicidade em todos os momentos, por estarem sempre juntos celebrando cada vitória, por nos manter firmes em nossas metas e nos fazermos lembrar todos os dias que somos capazes. Encontramos em vocês a materialização da palavra “família”. Agradecemos por todas as vezes em que contribuíram para a realização de nossos sonhos.

Gostaríamos de agradecer a todos os professores que nos ajudaram ao longo dessa empreitada. A academia nos propôs diversos desafios ao longo do caminho e, sem o apoio desses professores, a realização desse sonho seria impossível. Agradecemos, em especial, à nossa professora e orientadora Kese Alberton e ao nosso co-orientador, Andre Alberton, por toda a paciência e todos os momentos de apoio que nos deram. Por terem nos acolhido, fazendo um excelente trabalho e mostrando serem profissionais e seres humanos incríveis.

Agradecemos também aos nossos familiares, amigos e aos colegas que a vida acadêmica nos deu, pelo companheirismo durante nosso trajeto, por estarem conosco em todos os momentos, por oferecerem suporte nos períodos mais difíceis, por nossos cafés, nossas conversas e risadas, o que nos motivou e manteve a nossa perseverança durante todo esse tempo. Por fim, um agradecimento à Universidade Federal do Rio de Janeiro que, por ser um ambiente social e culturalmente plural, nos proporcionou momentos inesquecíveis e contato com pessoas tão inspiradoras.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Química.

ANÁLISE HAZOP ORIENTADA POR GRAFOS

Gabriel Ferreira Motta de Souza
Lucas Caetano Vivoni da Silva

Março, 2022

Orientadores: Prof^a. Kese Pontes Freitas Alberton
Prof. Andre Luis Alberton

Resumo: A HAZOP é uma análise de identificação de perigos e avaliação de riscos bastante popular e muito difundida em segurança de processos e prevenção de perdas de plantas químicas. Sua popularidade está sobretudo na associação entre identificar perigos e avaliar riscos, com seu foco principal no retorno que fornece acerca da operabilidade do processo que impacta positivamente sobre a produção. Contudo, em termos de análise de segurança de processo os resultados obtidos da HAZOP são puramente qualitativos, não fornecendo estimativas numéricas. Nesse âmbito, o presente trabalho teve por objetivo o uso de grafos, visando a identificação e análise de possíveis inconsistências, como ferramenta de apoio a HAZOP. Foram tratados dois estudos de caso: (i) caso 1 – HAZOP obtida da literatura, cujo sistema corresponde a uma unidade de produção de ácido nítrico; (ii) caso 2 – HAZOP real de um sistema de caldeiras de uma planta brasileira, cuja identificação será protegida em termo de sigilo e confidencialidade. Na metodologia empregada, para cada caso, a partir da tabela gerada pela análise HAZOP fez-se a inserção de relação de eventos, onde cada um corresponde a um vértice do grafo, e cada relação a uma aresta, gerando matrizes de adjacências. Cadastradas tais informações, seguiu-se a análise por grafos, indicando possíveis inconsistências e suas causas raiz. De posse do relatório, as sequências de eventos suspeitos de conter inconsistências foram submetidas à análise criteriosa, procurando-se identificar quais relações propostas podem ter levado à tais inconsistências e se estas são de fato incorreções da HAZOP. Aplicada ao caso teste obtido da literatura e ao caso real, os resultados obtidos indicaram que a metodologia é capaz de identificar adequadamente inconsistências. Os resultados obtidos e analisados frente a HAZOP e aos fluxogramas de processo comprovaram a funcionalidade da metodologia, permitindo identificar efeitos opostos em um mesmo fecho transitivo direito. Dessa forma, foi possível verificar de forma criteriosa se a inconsistência da HAZOP se tratava de uma falha na análise ou não, gerando maior entendimento a cerca do processo.

ÍNDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | JUSTIFICATIVAS E OBJETIVO..... | 3 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3.1 | Estudo de Perigos e Operabilidades – HAZOP..... | 8 |
| 3.2 | Grafos..... | 9 |
| 3.3 | Estudos anteriores | 15 |
| 3.3.1 | Heurísticas de HAZOP analisadas por grafos: “Heurísticas de HAZOP analisada por grafos: Estudos de caso”, por GUILHERME G.D., ELIAS L.P., NASCIMENTO C.F. e ALBERTON A.L. (2018) | 15 |
| 3.3.2 | Ferramentas computacionais nos estudos de HAZOP: “Utilização de ferramentas computacionais para avaliação de estudos de HazOp”, por GUILHERME, G. D. (2018)..... | 17 |
| 3.4 | Softwares existentes no mercado | 19 |
| 3.5 | Conclusões parciais..... | 21 |
| 4 | METODOLOGIA | 23 |
| 4.1 | Metodologia da análise HAZOP | 23 |
| 4.2 | Metodologia de grafos aplicados a HAZOP | 25 |
| 4.3 | Estudo de caso 1: Planta de produção de ácido nítrico | 28 |
| 4.4 | Estudo de caso 2: Planta de geração de vapor..... | 30 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 36 |
| 5.1 | Estudo de caso 1 – Planta de ácido nítrico | 36 |
| 5.2 | Estudo de caso 2 – Planta de geração de vapor..... | 38 |
| 5.2.1 | Redução da pressão ocasionando seu aumento no mesmo equipamento. | 38 |
| 5.2.2 | Redução da temperatura ocasionando seu aumento no mesmo equipamento. | 40 |
| 6 | CONCLUSÕES | 42 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 44 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Gerenciamento de riscos..... | 1 |
| Figura 3.1 Possíveis representações para estruturas de um grafo. | 9 |
| Figura 3.2. Exemplos de fechos transitivos..... | 10 |
| Figura 3.3. União entre dois grafos..... | 11 |
| Figura 3.4. Intersecção entre dois grafos..... | 11 |
| Figura 3.5. Soma disjunta de dois grafos. | 12 |
| Figura 3.6. Soma direta de dois grafos..... | 12 |
| Figura 3.7. Elementos de uma matriz de incidência. | 13 |
| Figura 3.8. Matriz de incidência de um grafo. | 13 |
| Figura 3.9. Elementos de uma matriz de adjacência. | 14 |
| Figura 3.10. Matriz de adjacência de um grafo..... | 14 |
| Figura 3.11. Determinação da causa raiz. | 15 |
| Figura 3.12. Ilustração de ciclos suspeitos para o sistema flash. | 16 |
| Figura 3.13. Software PHA-Pro. | 20 |
| Figura 3.14. Software Isograph HAZOP+. | 21 |
| Figura 4.1. Sequência esquemática de HAZOP. | 24 |
| Figura 4.2. Exemplo hipotético da análise de HAZOP. | 25 |
| Figura 4.3. Fragmento da tabela de inserção de dados..... | 26 |
| Figura 4.4. Identificação de sequências suspeitas através da rotina computacional. | 27 |
| Figura 4.5. Exemplos de sequências suspeitas de inconsistências. | 27 |
| Figura 4.6. Case 1 – fluxograma de Processo, antes de realização da HAZOP..... | 28 |
| Figura 4.7. Caso 2 - fluxograma de processo simplificado: sistemas de caldeiras de uma planta real. | 33 |
| Figura 5.1. Inconsistência inserida de forma proposital..... | 37 |
| Figura 5.2. Representação da inconsistência no fluxograma. | 37 |
| Figura 5.3. Inconsistência de pressão baixa resultando em pressão alta..... | 39 |
| Figura 5.4. Inconsistência de pressão baixa resultando em pressão alta representada no fluxograma | 39 |
| Figura 5.5. Inconsistência de temperatura baixa resultando em temperatura alta..... | 40 |
| Figura 5.6. Inconsistências de temperatura representadas no fluxograma das caldeiras..... | 41 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1. Sequências suspeitas ou inconsistências obtidas para a planta de CO ₂ | 18 |
| Tabela 4.1. Índices cadastrados: caso 1..... | 29 |
| Tabela 4.2. Mapeamento da análise de HAZOP: caso 1..... | 30 |
| Tabela 4.3. Índices cadastrados: caso 2..... | 31 |
| Tabela 4.4. Mapeamento da análise de HAZOP: caso 2..... | 34 |

1 INTRODUÇÃO

As análises de segurança de processos e prevenção de perdas (SPPP) visam a identificação de perigos e avaliação de riscos, com a consequente adição de camadas ou barreiras de segurança no processo. A partir destas análises é possível identificar os perigos e avaliar os riscos associados a estes, fazendo o seu gerenciamento por meio da classificação em aceitáveis, controláveis ou elimináveis, utilizando as camadas preventivas e mitigadoras de acidentes para que tal classificação seja atendida na prática como descrito pela Figura 1.1.

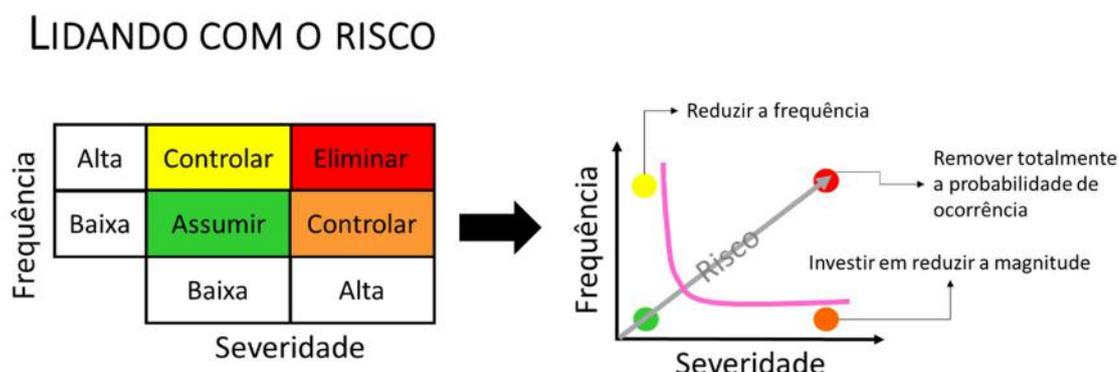


Figura 1.1. Gerenciamento de riscos.

Fonte: ALBERTON, Kese, 2020b.

Embora o principal objetivo seja o de prevenção, de acordo com Rossing et al. (2010), tais estudos podem mitigar os impactos de acidentes sobre perdas humanas, ambientais e econômicas, além dos prejuízos de imagem e reputação. O modo mais direto de encarar os acidentes na indústria química é por meio da antecipação, tomando medidas para evitá-los e inibindo qualquer evento causal que possa desencadear eventos fora da condição normal de projeto da planta. Investir na prevenção deve ser sempre o primeiro passo, mas é sabido que há sempre a probabilidade de ocorrência do acidente, mesmo que

baixa, e principalmente em caso de danos severos, deve-se buscar reduzi-los ao máximo. Assim as medidas e ações de segurança vão se basear em introduzir as camadas de proteção e mitigação, também conhecidas como salvaguardas. Estas podem ser entendidas como dispositivos, sistemas ou ações que inibem a sequência de acontecimentos que seguem ao evento inicial de um cenário de acidente, evitando um final indesejado – o acidente (CCPS, 2008).

Dentre as análises de SPPP que gozam de maior popularidade nas indústrias químicas pode-se citar o Estudo de Perigos e de Operabilidade (HAZOP, do termo em inglês Hazard and Operability Study). O principal objetivo de uma HAZOP é investigar de forma minuciosa e metódica cada segmento de um processo, focando os pontos específicos do projeto, visando descobrir todos os possíveis desvios das condições normais de operação e identificando as causas responsáveis por tais desvios e suas respectivas consequências (CROWL & LOUVAR, 2015).

Devido ao seu nível de detalhe, a HAZOP é considerada pela maioria dos autores como a análise mais completa (CROWL & LOUVAR, 2015). Pela sua complexidade, demanda muito tempo da equipe realizadora e conseqüente custo para a companhia. Porém, “companhias que utilizam a HAZOP como técnica de SPPP afirmam que o processo opera com maior estabilidade, requer menor tempo para manutenção, há melhoria da qualidade do produto e redução da produção de resíduos, além da maior confiança na segurança do processo por parte dos funcionários da planta” (CROWL & LOUVAR, 2015).

Apesar da sua boa fama, assim como outras técnicas, a HAZOP também apresenta algumas restrições. Uma das dificuldades associadas a esta análise é o fato de se avaliar apenas falhas de processos para determinar as potenciais anormalidades de engenharia. Os resultados obtidos são puramente qualitativos, não fornecendo estimativas numéricas nem qualquer tipo de classificação em categorias (CARDELLA, 2016). Assim, a HAZOP por si só não garante que todos os perigos sejam identificados e seus riscos associados sejam avaliados, bem como todos os problemas de operabilidade sejam verificados.

Neste cenário, este trabalho de conclusão de curso, propôs o uso de grafos, uma grandeza matemática, que possui representação numérica e visual, como ferramenta de apoio a HAZOP. O objetivo é utilizar uma ferramenta computacional baseada em grafos para identificar possíveis inconsistências presentes na HAZOP, tornando a análise livre de incorreções e com representação numérica e visual para o processo estudado.

2 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVO

A HAZOP é uma das metodologias mais empregadas para identificação de perigos e avaliação de riscos em plantas industriais. Trata-se de uma análise sistemática que primeiro divide a planta em nós, e sobre cada nó, mediante o uso de palavras-chaves (e.g., mais, menos) analisa possíveis desvios das variáveis de processo do nó analisado (e.g., temperatura, vazão), as causas possíveis destes desvios e suas consequências. Também, associada às consequências, são propostas possíveis providências a serem tomadas e/ou salvaguardas a serem implementadas.

Apesar das suas vantagens e de gozar de grande popularidade na indústria, a HAZOP tem como principal desvantagem a subjetividade das análises, que requer uma equipe holística com grande experiência no processo investigado. Diversas alternativas têm sido propostas para auxiliar as equipes durante a análise, destacando-se a simulação dinâmica e o uso de grafos. Apesar de muitos trabalhos abordarem o assunto há décadas, no cotidiano das empresas, tipicamente, a HAZOP é feita na forma tradicional, sem o auxílio de ferramentas adicionais. A simulação dinâmica, por exemplo, requer a implementação do modelo da planta em um software de simulação, o que requer um nível de informação frequentemente indisponível. O uso de grafos por outro lado, é relativamente simples, e pode ser mais facilmente integrado ao cotidiano. Ao transformar as informações (e.g.; nós, variáveis, palavras-guias) em matrizes de adjacência e/ou incidências, pode-se mapear a sequência de eventos relacionados ao longo de toda a planta. Informações importantes podem então ser extraídas, como aparentes incoerências da HAZOP e a busca de causas raiz dos desvios.

Neste contexto, o presente trabalho de conclusão de curso visa a aplicação de uma nova metodologia por meio de rotinas de programação desenvolvidas na universidade. Foi utilizada uma ferramenta de análises de grafos elaborada pelo grupo de pesquisa da Prof^a Kese P. F. Alberton e Prof. André Luis Alberton, que permite a identificação de sequências de eventos suspeitos. Por possíveis inconsistências, definem-se efeitos opostos ligados por

uma mesma cadeia de eventos (embora efeitos opostos podem de fato estar ligados a uma mesma cadeia de eventos, no nível da HAZOP, isto provavelmente deve-se ao erro das causas e consequências propostas). Por exemplo, se um evento levar a um aumento e a uma diminuição da mesma temperatura da mesma corrente, possivelmente isto é uma inconsistência. A ferramenta também permite a análise de causas raiz, que permitem investigar o vento de origem que leva a sequência suspeita.

Para este trabalho foram estudados dois casos:

- Caso 1: neste caso foi tratada a HAZOP de uma unidade de produção de ácido nítrico, obtida a partir da literatura (TOWLER & SINNOT, 2013). O estudo de um caso descrito pela literatura permite validar a metodologia que foi proposta, visto que sua solução é conhecida. Adicionalmente, por apresentar maior simplicidade que os casos reais esse estudo permite uma maior e melhor compreensão da metodologia que foi proposta e dos resultados obtidos, tornando a apresentação dos mesmos mais didática.
- Caso 2: neste caso foi tratada a HAZOP do sistema de caldeiras e distribuição de vapor de uma planta real, localizada no Brasil, protegida em termo de sigilo e confidencialidade. O estudo de caso real fornece um desafio, permitindo ampliar os conhecimentos acerca do que foi proposto, além de validar a metodologia frente a problemas complexos.

Com isto, busca-se apoiar numérica e visualmente as análises de HAZOP desenvolvidas, com efeitos à segurança da operação da planta. Dois estudos anteriores motivaram o presente trabalho ao utilizar ferramentas matemáticas que contribuem no estudo da HAZOP. O primeiro trabalho Guilherme et al. (2018), trata-se de Heurísticas de HAZOP analisadas por grafos, onde são avaliados três estudos de caso em que a implementação dos grafos permitiu a identificação de ciclos suspeitos para cada um separadamente. Já o segundo trabalho, Guilherme (2018), utiliza ferramentas computacionais nos estudos de HAZOP, em que duas metodologias distintas são empregadas e elucida a criação de matrizes causa-efeito que, combinadas entre si, através de rotinas computacionais, mostram sequências suspeitas para um processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas últimas décadas, muito se tem falado em saúde, segurança e meio ambiente dentro do universo empresarial. Com foco cada vez maior em segurança, as empresas vêm gradativamente buscando excelência em sua gestão, por meio de medidas e ações de gerenciamento da segurança dos processos produtivos, empregando técnicas de identificação dos perigos e de avaliação dos riscos (CARDELLA, 2016).

Há muitas ambiguidades e controvérsias acerca dos termos utilizados em Segurança de Processos e Prevenção de Perdas (SPPP), sobretudo com relação aos conceitos de perigo e risco, que não raro são considerados sinônimos, aumentando a dificuldade de compreensão das análises aos problemas tratados nesta área (ALBERTON, Kese, 2020b; CCPS, 2008). Neste sentido, apresentam-se a seguir algumas definições para termos de SPPP recorrentes neste trabalho (ALBERTON, Kese, 2020b; CROWL & LOUVAR, 2015):

- Perigo: condição potencialmente causadora de danos.
- Risco: é a medida do perigo, obtida pela avaliação dos danos a partir da combinação entre a frequência de ocorrência e a magnitude dos mesmos; ou seja, associação entre a probabilidade e a severidade dos danos.
- Falha: defeito ou condição anormal.
- Incidente: evento inesperado que pode levar a um acidente.
- Acidente: evento inesperado que causa danos.

Adicionalmente, é importante notar que o conceito de segurança se desdobra em dois grandes segmentos: (i) segurança ocupacional e (ii) segurança de processos. Popularmente tratada como saúde e segurança ocupacional (SSO) este ramo da segurança está relacionado as várias medidas e ações a serem adotadas por empresas, com o principal objetivo de fornecer a proteção dos colaboradores no local de trabalho. A SSO está focada na integridade do trabalhador, e de modo geral se ocupa com doenças (e.g., surdez temporária ou definitiva, lesão por esforço repetitivo (LER), asma ocupacional, dermatose ocupacional, síndrome de burnout) e acidentes de trabalhos (e.g., quedas, tropeços, cortes), insalubridade e periculosidade da atividade exercida. No Brasil a SSO é tratada pela consolidação de leis

trabalhistas (CLT) associada a um conjunto de normas regulamentadoras (NR), que compõe-se de 37 NRs, regulando obrigações, direitos e deveres a serem cumpridos por empregadores e trabalhadores em diferentes setores e para diversas atividades. O acesso às NRs é livre, sendo disponível no site do Ministério do Trabalho e da Previdência (BRASIL, 2022).

A segurança de processos, também conhecida por prevenção de perdas ou segurança de processos e prevenção de perdas (SPPP), trata do uso de metodologias e técnicas visando desenvolver estratégias eficazes em eliminar, controlar ou reduzir riscos a integridade das instalações e prevenir perdas no processo, o que de modo indireto contempla a SSO (ALBERTON, 2020). Em SPPP os acidentes são tipicamente originados por perda de contenção, liberação de conteúdo, por falhas que levam a integridade dos equipamentos do processo (e.g., rompimento ou furo ou trincas ou rachaduras em recipientes de processo ou tubulações, ou mesmo montagem ou soldagem inadequada de juntas e conexões), de modo que um termo comum para tratar a SPPP é “manter o processo dentro dos tubos” (do inglês, “*Keeping process in the tubes*”), a fim de tornar evidente a relação de SPPP com a perda de contenção (ALBERTON, Kese, 2020b). Portanto, o foco está em garantir a integridade das instalações, por meio de camadas de seguranças preventivas e mitigadoras, reduzindo a probabilidade da ocorrência dos acidentes e o impacto dos mesmos quando inevitavelmente ocorram. Neste trabalho a definição formal empregada para SPPP foi estabelecida como: prevenção e controle de acidentes por meio de técnicas apropriadas para identificar perigos e avaliar riscos em processos, sendo seu principal objetivo eliminar/reduzir/controlar os riscos associados aos perigos existentes em um processo (ALBERTON, Kese, 2020b).

O advento da tecnologia tem proporcionado melhorias constantes na área de SPPP. Atualmente, o conceito de segurança tem sido colocado em destaque; avanços recentes na segurança de processos químicos enfatizam o uso de ferramentas tecnológicas apropriadas, que acabam por gerar informações para a tomada de decisões de segurança com relação ao projeto e operação da planta. Dessa forma, processos mais complexos requerem tecnologias de segurança mais complexas e, nesse contexto, acredita-se que o desenvolvimento e aplicação de tecnologias de segurança é atualmente uma restrição para o crescimento da indústria química (CROWL & LOUVAR, 2015).

Assim, dada notoriedade cada vez maior da área de SPPP foram desenvolvidas diversas metodologias ao longo dos anos capazes de identificar perigos e avaliar riscos em plantas industriais. Tais análises se dividem em qualitativas e quantitativas. As análises

qualitativas são geralmente utilizadas para uma triagem inicial com o intuito de identificar os pontos que demandam estudo mais detalhado, ou quando apenas a análise qualitativa é suficiente para a tomada de decisão, ou ainda quando houver carência de dados numéricos para a realização de uma análise quantitativa. Considerando as análises em ordem gradativa de teor, qualitativo ao quantitativo, podem-se destacar: a Análise Preliminar de Risco (APR, do termo em inglês *Preliminary Risk Analysis*), Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP, do termo em inglês *Hazard and Operability Study*), Análise de Camadas de Proteção (LOPA, do termo em inglês *Layers of Protection Analysis*), Análise de Modos de Falhas e Efeitos (FMEA, do termo em inglês *Failure Mode and Effect Analysis*), Análise de Árvore de Falhas (FTA, do termo em inglês *Fault-Tree Analysis*), Análise de Árvore de Eventos (ETA, do termo em inglês *Event-Tree Analysis*) e Análise Quantitativa de Risco (AQR).

As técnicas APR e a HAZOP, ambas de natureza qualitativa, parecem ser as mais utilizadas em processos industriais. APR por sua versatilidade, visto ser aplicável a qualquer atividade, e a HAZOP por fornecer adicionalmente informações acerca da operabilidade do processo. A grande diferença em termos de metodologia é que: (i) a APR tem foco no perigo, todo o procedimento tem por base listar os possíveis perigos e a partir daí listar suas possíveis causas, possíveis consequências, e possíveis recomendações de segurança, (ii) a HAZOP tem foco nos desvios de operação do processo, todo o procedimento tem por base em listar os possíveis desvios de operação que podem levar a condições anormais do processo, e a partir daí listar suas possíveis causas, suas possíveis consequências e possíveis recomendações de segurança. Assim, de menor complexidade, a APR exige uma menor quantidade de informação do processo para sua realização, e não raro precede a HAZOP, que entrega resultados mais completos em termos de SPPP. (TOWLER & SINNOT, 2013)

Assim, por se tratar de uma análise que agrega valor ao entendimento e conhecimento da operabilidade do processo, podendo ser implementada desde o projeto conceitual da planta industrial, a HAZOP adquiriu grande popularidade na indústria, sendo muito utilizada em plantas químicas (CROWL & LOUVAR, 2015; TOWLER & SINNOT, 2013; COUPER et. al, 2004). Por sua natureza qualitativa, além de ser baseada em heurísticas, esta técnica não fornece estimativas numéricas ou qualquer tipo de classificação em categorias.

3.1 Estudo de Perigos e Operabilidades – HAZOP

A HAZOP pode ser entendida como uma técnica de caráter qualitativo cujo propósito é identificar e avaliar desvios da condição normal de operação do processo, permitindo identificar indiretamente falhas que possam caracterizar riscos para as instalações, com o objetivo principal voltado para a prevenção de perdas e danos (NOLAN, 1994). Assim, esta análise visa identificar os problemas de operabilidade de uma instalação de processo avaliando o impacto destes problemas na sua segurança, por meio da revisão metódica do projeto da planta.

Segundo NOLAN, 1994, dentre algumas motivações pelas quais a elaboração de um HAZOP se faz necessária dentro de uma organização para o melhor e mais seguro exercício de suas atividades, destacam-se:

- Análise parte a parte do processo, ampliando o conhecimento acerca da operação e controle do mesmo.
- Detecção dos desvios operacionais que predispõe a ocorrência de perdas e danos.
- Diagnóstico dos desvios operacionais permitindo identificar os riscos, suas causas e suas consequências.
- Aumento da segurança do processo com a complementação de camadas de segurança preventivas e mitigadoras por meio da recomendação de salvaguarda.
- Atender aos requisitos de produção do processo, como por exemplo a quantidade e qualidade final dos produtos.
- Formação de uma equipe multidisciplinar altamente capacitada a resoluções de problemas relacionados ao processo.

É importante notar que a HAZOP é uma ferramenta de análise qualitativa que, embora forneça uma vista detalhada do processo capaz de auxiliar na tomada de decisão e na elaboração de estratégias de segurança de processo, pode estar sujeita a variações dos seus resultados sobretudo devido a subjetividade da equipe. Além disso, por se tratar de uma análise longa e bastante detalhada, a HAZOP também está passível de inconsistências. Buscando tratar estas dificuldades alguns estudos vêm utilizando grafos para tornar a HAZOP mais numérica e obter uma representação visual dos seus resultados.

3.2 Grafos

Um grafo pode ser encarado como uma ferramenta de extrema utilidade quando se trata da representação e solução dos mais variados tipos de problemas. Na linguagem matemática, um grafo sugere relações de dependência mútua existentes entre elementos de um conjunto, possuindo uma excelente representação gráfica. Neste cenário, os elementos do conjunto são exibidos como pontos ou círculos e recebem o nome de vértices ou nós. As relações entre os elementos do conjunto são caracterizadas por traços ou setas que ligam os pontos a que são atribuídos os nomes de arestas ou arcos (GOLDBERG & GOLDBERG, 2012).

Para as ocasiões em que as propriedades entre os elementos de um dado conjunto dependem de sua origem, tem-se que os grafos são ditos direcionados, também denominados dígrafos. Para os dígrafos, os índices representam a direção considerada, de modo que “ a_{xy} ” representa uma ligação direcionada que tem origem no vértice x e término no vértice y . As ligações nos grafos direcionados são chamadas de arcos, e sua representação gráfica implica um traço com uma seta indicando o sentido da relação considerada (GOLDBERG & GOLDBERG, 2012). A Figura 3.1 apresenta as possíveis representações para estruturas de um grafo (GOLDBERG & GOLDBERG, 2012).

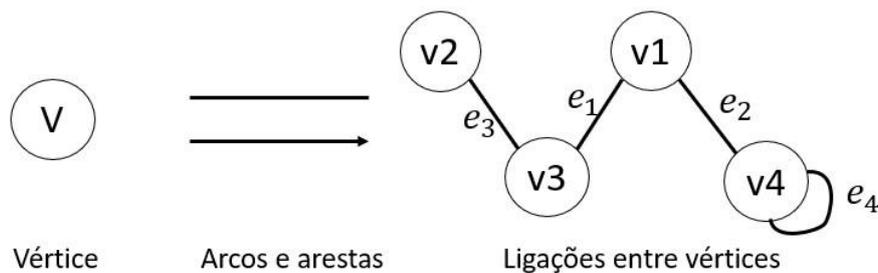


Figura 3.1 Possíveis representações para estruturas de um grafo.

Fonte: Adaptado de GOLDBERG & GOLDBERG, 2012.

Dessa forma, um grafo $G = \{V, E\}$ pode ser representado pelo seu conjunto de vértices $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ e arestas $E = \{\{v_1, v_3\}, \{v_1, v_4\}, \{v_2, v_3\}, \{v_4\}\}$. No caso de um dígrafo, $\{v_1, v_4\} \neq \{v_4, v_1\}$.

As ligações entre vértices dão origem aos chamados fechos transitivos, como apresentado pela Figura 3.2, representados pelo símbolo (Γ), que retratam o conjunto de vértices alcançáveis a partir de um dado vértice v_i por algum caminho. Para grafos direcionados, os fechos podem ser denominados diretos $\Gamma^d(v_i)$ ou inversos $\Gamma^i(v_i)$. Assumindo v_1 como o vértice de interesse, o seu fecho transitivo direto compreende todos os vértices alcançáveis por caminhos partindo de v_1 . Em relação ao fecho inverso, este contém os vértices que alcançam v_1 , ou seja, nenhum nesse caso.

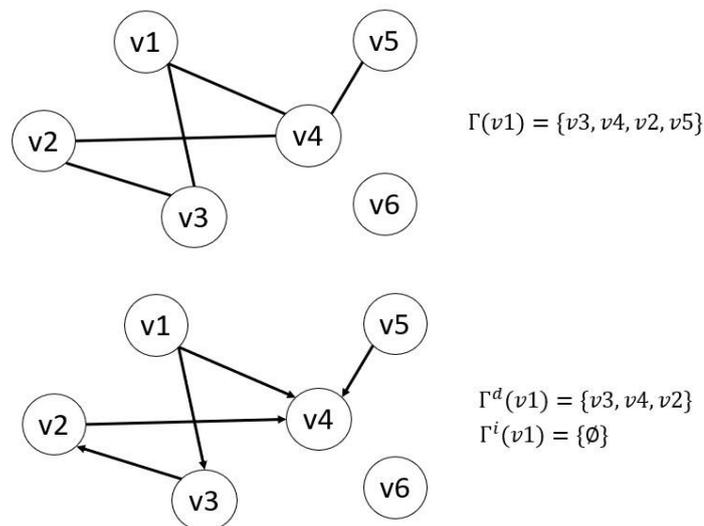


Figura 3.2. Exemplos de fechos transitivos.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Um ou mais grafos podem se associar por meio de operações (unitárias ou binárias). Supondo um grafo genérico $\mathbb{G} = \{\mathbb{V}, \mathbb{E}\}$. Podemos definir as seguintes operações unitárias:

- Contração de arestas: ao contrair uma aresta $\{v_i, v_j\}$, mesclam-se vértices $\{v_i, v_j\}$ em um único vértice;
- Complemento: o complemento do grafo \mathbb{G} , grafo simples, constitui-se em ter apenas um grafo com os mesmos vértices de \mathbb{G} . Todavia, possuindo como apenas os pares não ligados do grafo como arestas;
- Adição/Remoção de arestas ou vértices: é possível adicionar ou retirar vértices e/ou arestas nos grafos (descritas em termos de operações binárias).

Agora supondo dois grafos $\mathbb{G}_1 = \{\mathbb{V}_1, \mathbb{E}_1\}$ e $\mathbb{G}_2 = \{\mathbb{V}_2, \mathbb{E}_2\}$. Pode-se então exprimir as seguintes operações binárias:

- União: $\mathbb{G}_1 \cup \mathbb{G}_2 = \{\mathbb{V}_1 \cup \mathbb{V}_2, \mathbb{E}_1 \cup \mathbb{E}_2\}$ como apresentado pela Figura 3.3.

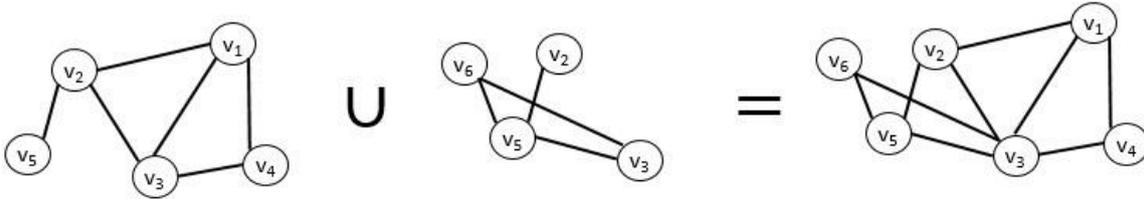


Figura 3.3. União entre dois grafos.

Fonte: Autoria própria, 2022.

1. Intersecção: $\mathbb{G}_1 \cap \mathbb{G}_2 = \{\mathbb{V}_1 \cap \mathbb{V}_2, \mathbb{E}_1 \cap \mathbb{E}_2\}$ como apresentado pela Figura 3.4.

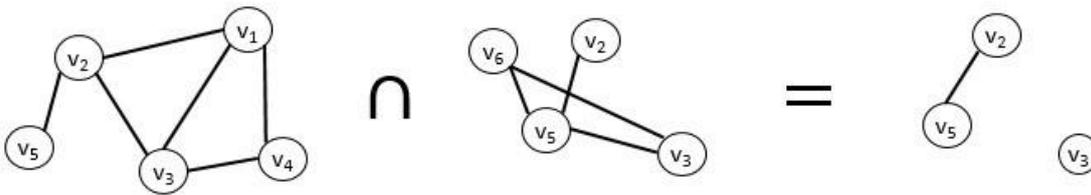


Figura 3.4. Intersecção entre dois grafos.

Fonte: Autoria própria, 2022.

2. Soma Disjunta: $\mathbb{G}_1 + \mathbb{G}_2 = \{\mathbb{V}_1 \cup \mathbb{V}_2, \mathbb{E}_1 \cup \mathbb{E}_2 \cup \mathbb{E}_3\}$, onde $\mathbb{E}_3 = (\{v_i, v_j\}, \forall v_i \in \mathbb{V}_1, v_j \in \mathbb{V}_2)$, onde \mathbb{G}_1 e \mathbb{G}_2 são os grafos disjuntos, como apresentado pela Figura 3.5.

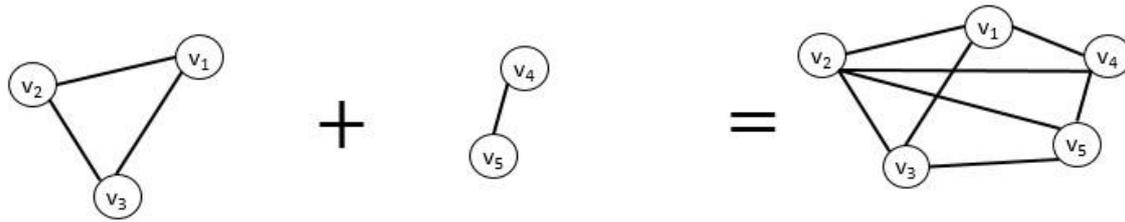


Figura 3.5. Soma disjunta de dois grafos.

Fonte: Autoria própria, 2022.

3. Soma Direta: $\mathbb{G}_1 \oplus \mathbb{G}_2 = \{V_1 \cup V_2, E_1 \cup E_2 \setminus (E_1 \cap E_2)\}$, como apresentado pela Figura 3.6.

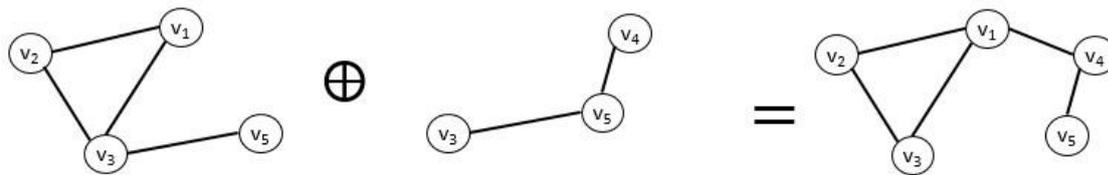


Figura 3.6. Soma direta de dois grafos.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Uma das formas mais empregadas de trabalhar com grafos é a construção de matrizes. Essa estrutura é amplamente utilizada por linguagem de programação, que identifica o grafo como um vetor (GONÇALVES, 2014). Existem dois tipos de matrizes aplicadas ao conceito de grafos: a matriz de incidência e a matriz de adjacência.

Uma matriz de incidência, é composta por nV linhas e nE colunas e traduz a informação de quantas vezes um vértice incide em uma aresta, como apresentado pela Figura 3.7. Seu conjunto de elementos $B_{i,j}$ pode assumir valores de 0, 1 ou 2 dependendo se o vértice não existe na aresta, existe e não é único ou se existe e é único na aresta, respectivamente.

$$B_{i,j} = \begin{cases} 0 & v_i \notin e_j \\ 1 & v_i \in a_j, e_j \setminus \{v_i\} \neq \emptyset \\ 2 & v_i \in a_j, e_j \setminus \{v_i\} = \emptyset \end{cases}$$

Figura 3.7. Elementos de uma matriz de incidência.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Dado um grafo formado por vértices $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ e arestas $E = \{\{v_1, v_3\}, \{v_1, v_4\}, \{v_2, v_3\}, \{v_4\}\}$, sua matriz de incidência é dada por $B(\mathbb{G})$, como apresentado pela Figura 3.8.

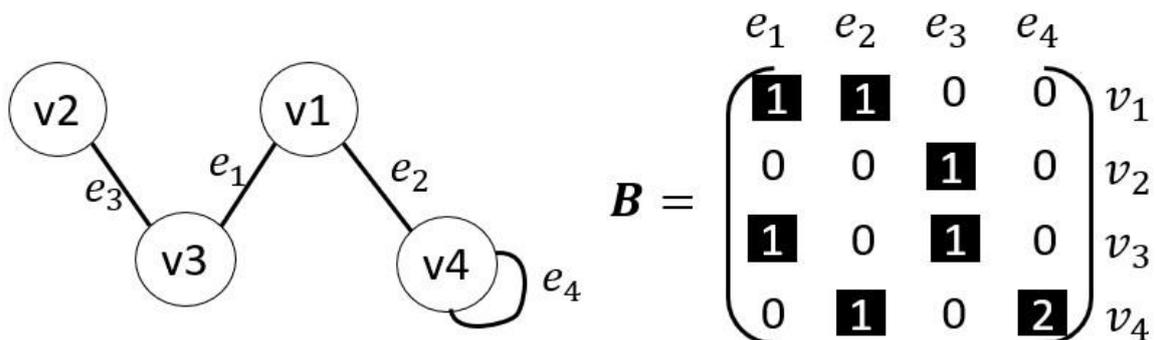


Figura 3.8. Matriz de incidência de um grafo.

Fonte: Autoria própria, 2022.

A matriz de adjacência é uma das formas de se representar um conjunto de informações (e.g., dados de processos, sequência de eventos) utilizando grafos. Dado um grafo com um número de vértices igual a n , podemos representá-lo por uma matriz quadrada ($n \times n$). Em grafos não direcionados, as matrizes de adjacência são simétricas ao longo da diagonal principal, ou seja, a entrada a_{xy} é igual à entrada a_{yx} . Matrizes de adjacência de grafos direcionados, no entanto, não são assim. Em um dígrafo, a entrada a_{xy} da matriz é 1 se há um arco do vértice x para o vértice y , e 0, do contrário, como apresentado pela Figura 3.9 (CHARTRAND & LESNIAK, 2004).

$$A_{i,j} = \begin{cases} 0 & (v_i, v_j) \notin \mathbb{E} \\ 1 & (v_i, v_j) \in \mathbb{E} \end{cases}$$

Figura 3.9. Elementos de uma matriz de adjacência.

Fonte: Autoria própria, 2022.

A definição das entradas da matriz a ser montada varia de acordo com as propriedades do grafo que se deseja representar. Entretanto, de modo generalista, o valor a_{xy} guarda informações sobre como os vértices v_x e v_y estão ligados, como mostra a Figura 3.10.

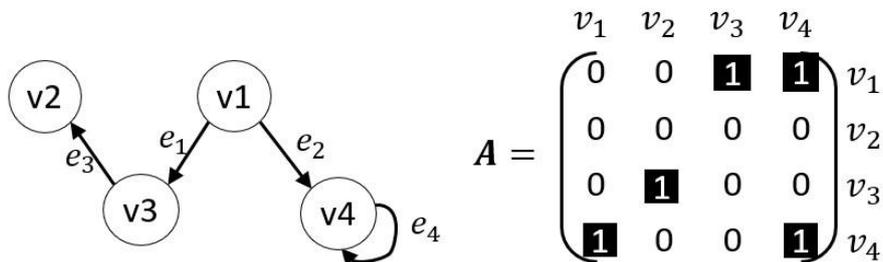


Figura 3.10. Matriz de adjacência de um grafo.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Nota-se pela matriz gerada na Figura 3.10, que alguns vértices não possuem arestas direcionadas para eles. Com essa observação pode-se avaliar a causa raiz de um fecho transitivo. A causa raiz corresponde ao evento inicial que não se originou de nenhum outro. No exemplo acima, existem dois fechos transitivos diretos: $\Gamma_1^d(v1) = \{v2, v3\}$ e $\Gamma_2^d(v1) = \{v4\}$. Portanto, ao dividir cada um em uma matriz de adjacência separada, fica evidente que o evento referente ao primeiro vértice não possui origem e, portanto, é a causa raiz da sequência analisada, como apresentado pela Figura 3.11.

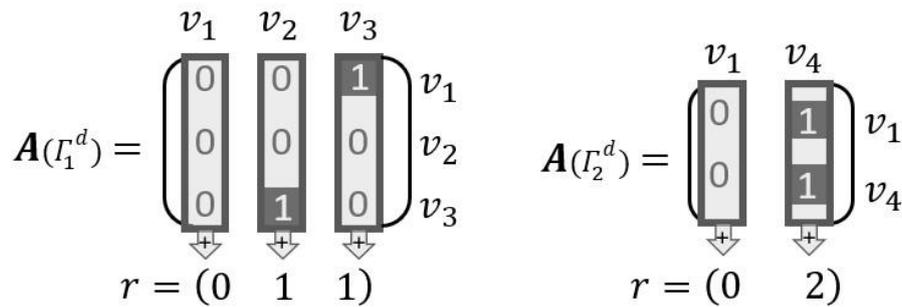


Figura 3.11. Determinação da causa raiz.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Utilizando estes conceitos, foi proposta uma abordagem para criação de uma ferramenta mais objetiva e quantitativa de estudos de HAZOP, por meio da elaboração de matrizes de que relacionam a causa e efeito de desvios de condição normal em processos e que identifique vértices opostos em um mesmo fecho transitivo.

3.3 Estudos anteriores

Este trabalho tem sua ideia central baseada em dois estudos anteriores que são descritos a seguir.

3.3.1 *Heurísticas de HAZOP analisadas por grafos: “Heurísticas de HAZOP analisada por grafos: Estudos de caso”, por GUILHERME G.D., ELIAS L.P., NASCIMENTO C.F. e ALBERTON A.L. (2018)*

O objetivo principal deste trabalho foi abordar a natureza subjetiva da HAZOP, que é uma análise dependente de heurísticas, através da inserção de uma abordagem matemática possibilitada pela inclusão de grafos. Levantam-se questionamentos como possíveis inconsistências, fontes originais de perturbações, entre outras. Sua metodologia consiste no uso de grafos e dígrafos como formas de fornecer mais objetividade a análise de HAZOP, estabelecendo relações entre os eventos de um determinado processo.

Assim, por meio de estudos de caso, buscou-se avaliar se as HAZOP levam a considerações suspeitas ou incoerentes, bem como denotar os ciclos de dependência de variáveis. Foram investigados três casos distintos: sistema de compressão, sistema *flash* e uma planta de produção de dióxido de carbono. Foi elaborada uma matriz de adjacências de

eventos para cada estudo de caso separadamente, fazendo-se uso de regras heurísticas advindas da HAZOP de cada um deles.

A partir das matrizes de adjacências que foram montadas em cada estudo de caso, pôde-se implementar a análise de grafos para obtenção dos ciclos associados, sendo utilizado o pacote METANET em Scilab, com a função cyclebasis. Assim sendo, incoerências ou ciclos suspeitos puderam ser detectados, em que se criava artificialmente uma ligação entre efeitos opostos e chamava-se a rotina que obtém os ciclos. Os usos de matrizes booleanas permitiram avaliar as dependências entre variáveis do processo indicada pela HAZOP e, a partir daí, as ferramentas de análises de grafos permitiram obter os ciclos correspondentes. Os resultados mostraram que uma série de ciclos suspeitos puderam ser obtidos partindo dessas premissas.

Como exemplo, a Figura 3.12 apresenta as dependências levantadas para o estudo de caso do sistema flash, com destaque aos ciclos suspeitos, nos quais efeitos contrários aparecem na mesma sequência.

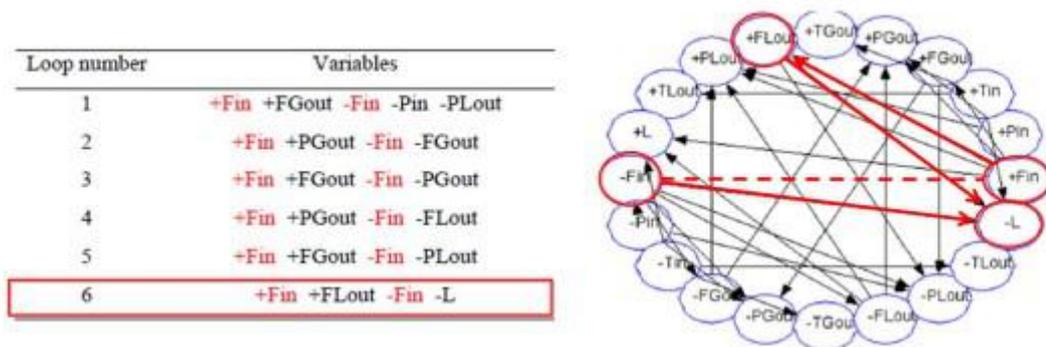


Figura 3.12. Ilustração de ciclos suspeitos para o sistema flash.

Fonte: GUILHERME et al., 2018.

No caso do ciclo de número 06 (destacado na figura III.13), a redução de nível ocorre tanto pelo aumento quanto pela redução da vazão de entrada, o que levanta questionamentos sobre uma possível inconsistência. Para os outros estudos de caso, também foram encontrados diversos possíveis erros de análise.

A forma proposta para a verificação de inconsistências ou ciclos suspeitos se mostrou útil no estudo das relações advindas das heurísticas, conseguindo capturar alguns desvios. Não foram constatadas incoerências diretas, embora um grande número de ciclos suspeitos tenha sido obtido.

3.3.2 *Ferramentas computacionais nos estudos de HAZOP: “Utilização de ferramentas computacionais para avaliação de estudos de HazOp”, por GUILHERME, G. D. (2018)*

Outro trabalho que fomentou e serviu como base citou o uso de ferramentas computacionais que podem dar um melhor encaminhamento a estudos de análise de perigos e operabilidade. O objetivo fundamental dessa dissertação foi o de mostrar que, apesar da HAZOP ser uma técnica bastante consolidada, também existem novas tendências que podem trabalhar em cooperação de modo a mitigar possíveis riscos, aumentando a confiabilidade da técnica, a fim de implementar esforços na área de SPPP.

Primeiramente foi utilizada uma abordagem no tocante à realização de simulações estacionárias de processo, usando softwares industriais tradicionais. Os resultados das simulações foram avaliados em forma de uma análise de sensibilidade, de maneira a estabelecer uma relação entre as variáveis de um mesmo processo, auxiliando os estudos de uma HAZOP.

A perspectiva que se utiliza de simulações estacionárias permite que processos sejam analisados, por meio de relações e conceitos fundamentais de engenharia, que fazem parte dos softwares de simulações presentes no mercado. Ainda, através da análise de sensibilidade, é notório observar quais variáveis são mais impactadas para cada perturbação, gerando resultados mais confiáveis e diminuindo a subjetividade do método. Logo, constitui uma ferramenta com potencial para contribuir nos estudos de HAZOP.

Uma segunda metodologia foi abordada visando a criação de uma representação objetiva de estudos de HAZOP, por meio da construção de matrizes causa-efeito para equipamentos da indústria química. As matrizes foram combinadas entre si, com o auxílio de rotinas computacionais e, de acordo com os estudos de caso, aplicadas com o objetivo de obter as consequências para dadas perturbações num processo químico.

Neste caso, mediante análises de grafos, foi possível caracterizar as inter-relações das variáveis lógicas e caracterizar o número de sequências com possíveis inconsistências obtidas a partir da técnica de HAZOP. A Tabela 3.1 descreve as sequências suspeitas (grifadas em vermelho) obtidas para a planta de CO₂ (um dos estudos de caso que foi abordado nesta dissertação).

| N° | Eventos |
|----|--|
| 1 | +1F,+2F,+D-02L,-1F,-2T |
| 2 | +1F,+2F,+4P,-1F,-2F,-2P,-3F,-3P |
| 3 | +1F,+2F,+3F,-1F,-2F,-2P,-4P |
| 4 | +1F,+2F,+4P,-1F,-2F,-2P,-3F,-3P,-5P |
| 5 | +1F,+2F,+4P,-1F,-2T,-3F,-3T,-5T |
| 6 | +1F,+2F,+4P,-1F,-2T,-3F,-3T,-5F,-5T,-6T |
| 7 | +10F,+12F,-10F,-12F,-13F,-13T,-14P |
| 8 | +10T,+12T,+16T,-10T,-12T,-13F,-13T,-14P |
| 9 | +12F,-12F,-13F,-13T,-14P |
| 10 | +12T,+13T,-12F,-12T,-13F,-13T,-14P |
| 11 | +12T,+16T,-12T,-13F,-13T,-14P |
| 12 | +13T,+14RF,+16T,-13F,-13T,-14P |
| 13 | +13T,+14RT,+16T,-13F,-13T,-14P |
| 14 | +13T,-12F,-13F,-13T,-14P |
| 15 | +14RF,+16F,+17F,+19P,-14RF,-16F,-17F,-18F |
| 16 | +14RF,+16F,+17T,+18T,+21T,+23T,-14RF,-16F,-17F,-18F,-21F,-23F,-D-05L |
| 17 | +14RF,+16F,+17T,-14RF,-16F,-17F,-D-01L |
| 18 | +16F,+17F,+19P,-16F,-17F,-18F |
| 19 | +16F,+17T,+18T,+21T,+23T,-16F,-17F,-18F,-21F,-23F,-D-05L |
| 20 | +16F,+17T,-16F,-17F,-D-01L |
| 21 | +14RF,+16F,+16T,+17F,+19P,-13F,-13T,-14P,-16F,-17F,-18F |
| 22 | +17F,+18F,+19P,-17F,-18F,-19P |
| 23 | +17F,+19F,+19P,-17F,-18F,-19P |
| 24 | +17F,+19P,+D-01L,-16F,-17F,-17T,-18F |
| 25 | +17F,+19P,-17F,-18F |
| 26 | +18F,+21F,+23T,-18F,-21F,-23F,-D-05L |

Tabela 3.1. Sequências suspeitas ou inconsistências obtidas para a planta de CO2.

Fonte: GUILHERME et al, 2018.

Diante das metodologias apresentadas, pode-se ressaltar o aspecto computacional como um ponto em comum, permitindo que ambas sejam aplicadas a diferentes sistemas, dependendo apenas de alguns comandos específicos para gerar os resultados possíveis de

serem obtidos pelas técnicas. Em suma, constatou-se que as abordagens empregadas possuem uma capacidade de incrementar informações aos estudos de HAZOP, o que permite auxiliar na localização de incoerências e na verificação de causas raiz das perturbações.

3.4 Softwares existentes no mercado

Atualmente, muitas empresas têm investido forte na área SPPP adotando o uso de softwares cada vez mais sofisticados para auxiliar suas rotinas de trabalho. No caso da HAZOP, existem alguns softwares no mercado que facilitam o trabalho da equipe que desenvolve o estudo.

Dentro desse contexto, o software PHA-Pro é uma ferramenta computacional, desenvolvida pela empresa Sphera, que se presta a facilitar a rotina de trabalho dos profissionais de Segurança que estão envolvidos nos estudos de HAZOP de algum processo.

O software foi criado para atuar na área de SPPP, contando com uma arquitetura virtual que permite realizar o registro e também a padronização dos dados de avaliação de risco. Com isso, ele pode assegurar que os controles adequados sejam devidamente implementados.

O PHA-Pro oferece um “leque de possibilidades” em relação ao gerenciamento de risco em SPPP, buscando otimizar o tempo do especialista, enquanto reduz o tempo de estudo e o tempo de relatório. Seus recursos oferecem uma maneira muito mais eficiente de gerenciar o risco, tais quais: vínculo dinâmico com planilhas, otimização do tempo, exportação de relatórios, disponibilização de modelos prontos para HAZOP e LOPA, entre outros. A Figura 3.13 apresenta a interface do software PHA-Pro.

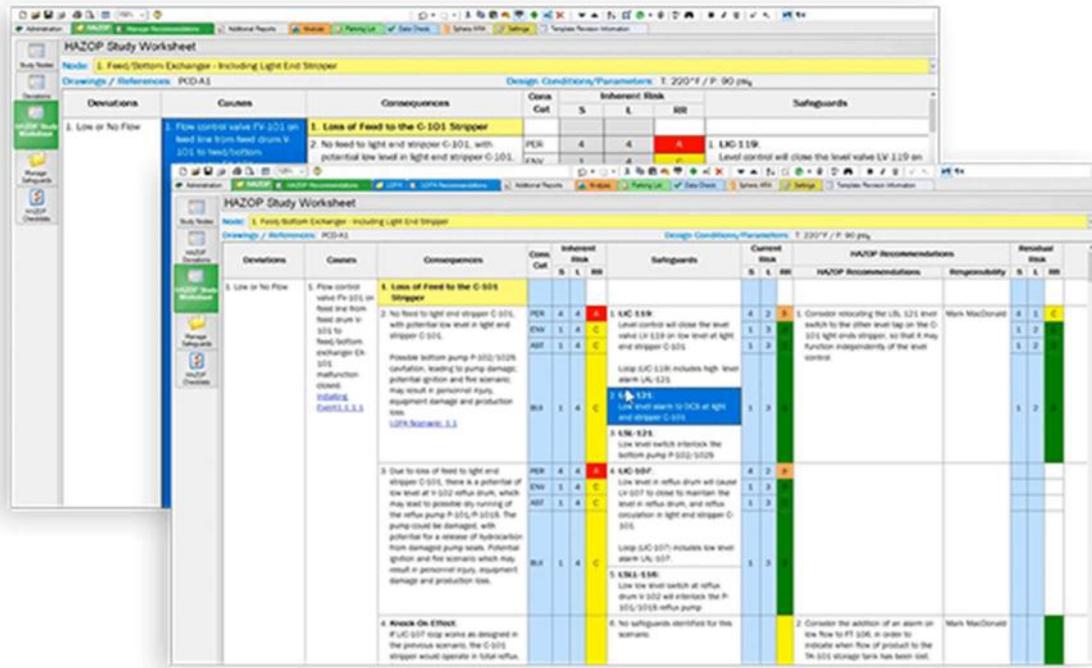


Figura 3.13. Software PHA-Pro.

Fonte: SPHERA, 2022.

Um segundo software que possui bastante aceitação e adesão no mercado e que também é voltado para a elaboração de HAZOP é o HAZOP+.

Trata-se de um ambiente virtual altamente personalizável e que oferece instrumentos para averiguação de potenciais problemas operacionais e de segurança em processos e prevenção de perdas. Ele também pode ser utilizado como ferramenta para simplificar etapas, tais quais:

- Customização;
- Gravação;
- Gerenciamento;
- Geração e exportação de diagramas;
- Relatórios do estudo.

Por permitir a customização integral das planilhas, dos diagramas e dos relatórios, o software pode ser facilmente implementado na rotina de segurança para uma diversidade de indústrias além da química, tais como as indústrias aeroespacial, automobilística e nuclear, por exemplo. A Figura 3.14 apresenta a interface do software Hazop+.

Project: Tutorial - Deviations.hazx - Hazop+ 7.0

File Edit Tools Help

Hazop Study Delete Autofit Columns Autofit Rows Reset Column Layout Record Up Record Down Spelling Help Switch Windows

Allow editing of all sessions Cell edit: On entry On key press or mouse click Font size: Create a new action when an exist

Session: Preliminary Session Node: <All Nodes> Deviation:

| N | Nodes | Deviations | Likelihood | Severity | Cost Ranking | Causes |
|---|---------------------|--------------------------------|------------|----------|--------------|-------------------|
| 1 | Process fluid line | Reverse process fluid flow | Remote | High | Medium | 1 Failure of p |
| 2 | Cooling water line | No cooling water flow | Remote | Moderate | Low | 1 Failure of c |
| 3 | Cooling water line | Less flow of cooling water | Remote | Moderate | Low | 1 Pipe block |
| 4 | Cooling water line | Less flow of cooling water | Occasional | Moderate | Low | 2 Pipe leakag |
| 5 | Cooling water line | More flow of cooling water | Occasional | Minor | Low | 1 Failure of c |
| 6 | Heat Exchanger tube | More pressure on tube side | Occasional | Critical | Unacceptable | 1 Failure of p |
| 7 | Heat Exchanger tube | Contamination of process fluid | Remote | High | Medium | 1 Leakage of lost |
| 8 | Heat | Corrosion of tube | Probable | Moderate | Medium | 1 Hardness o |

Edit enabled, this is the most recent session.

Figura 3.14. Software Isograph HAZOP+.

Fonte: ISOGRAPH, 2022.

3.5 Conclusões parciais

A busca na literatura por temas relacionados a Segurança de Processos e prevenção de perdas, evidencia a importância em se ter uma cultura de segurança dentro da indústria de processos químicos. Cada vez mais as NRs são atualizadas e ficam mais exigentes a fim de se evitar acidentes de trabalho. Adicionalmente, na área de SPPP diversas metodologias vêm sendo implementadas nas últimas décadas capazes de identificar perigos e avaliar riscos em plantas industriais e poder mitigá-los ou até mesmo evitar que ocorram. Dentro dessas metodologias destacamos a HAZOP, uma análise detalhada do processo, de cunho qualitativo e elaborado por uma equipe multidisciplinar.

Em suma, a revisão bibliográfica deste trabalho até então apresentada possibilitou vislumbrar que os autores consultados consideram a técnica do HAZOP como sendo um

instrumento bastante confiável para identificar desvios nos parâmetros do processo. Além disso, sua abordagem mostra o suporte necessário para facilitar a determinação de causas e efeitos usando como base o conhecimento de uma equipe multidisciplinar. No entanto, o presente estudo busca introduzir uma nova metodologia visando a inserção de ferramentas matemáticas para consolidar as informações obtidas na HAZOP.

Através do estudo da teoria de grafos, constata-se que ele de fato é uma ferramenta numérica de relativa simplicidade, que permite uma representação gráfica, o que pode ser muito útil no tratamento de problemas de engenharia. Além disso, existem atualmente no mercado diversos softwares prontos que facilitam o desenvolvimento de uma HAZOP. Logo, uma melhor interface contendo ferramentas de análise de grafos também seria um potencial instrumento para ser utilizado como análise quantitativa complementar ao estudo de uma HAZOP.

4 METODOLOGIA

A metodologia para a aplicação da rotina de programação proposta por este trabalho foi desenvolvida de forma a padronizar os desvios e palavras-chave para sua correta inserção na ferramenta. Foram escolhidos dois estudos de caso, um obtido a partir da literatura e outro de uma planta real, os quais possuem suas próprias análises de HAZOP prontas.

4.1 Metodologia da análise HAZOP

Muito empregada no ambiente industrial a análise HAZOP é um procedimento que subdivide o processo em partes, os chamados nós-de-estudo, que podem ser um equipamento ou uma unidade, a fim de estudar como possíveis efeitos aplicados sobre as variáveis de processos podem levar a desvios da condição normal de operação. É importante notar que a definição dos nós-de-estudo não é uma tarefa trivial e seu sucesso depende da experiência da equipe; não raro um nó pode ser redefinido mais de uma vez durante o estudo, a fim de englobar mais ou menos elementos do processo, de modo que o estudo acerca dos desvios seja melhor conduzido. Nesta etapa, é essencial o uso de toda a documentação do processo, como o fluxograma de engenharia e a folha de equipamentos.

Uma vez definidos os nós-de-estudo, geram-se perguntas de maneira estruturada e sistemática por meio do uso apropriado de um conjunto de palavras-guias aplicadas aos parâmetros do processo. Essa sequência é repetida o tanto quanto for necessário para cobrir todas as correntes e equipamentos de todos os nós.

Na Figura 4.1 é apresentada a sequência esquemática empregada para a análise HAZOP.

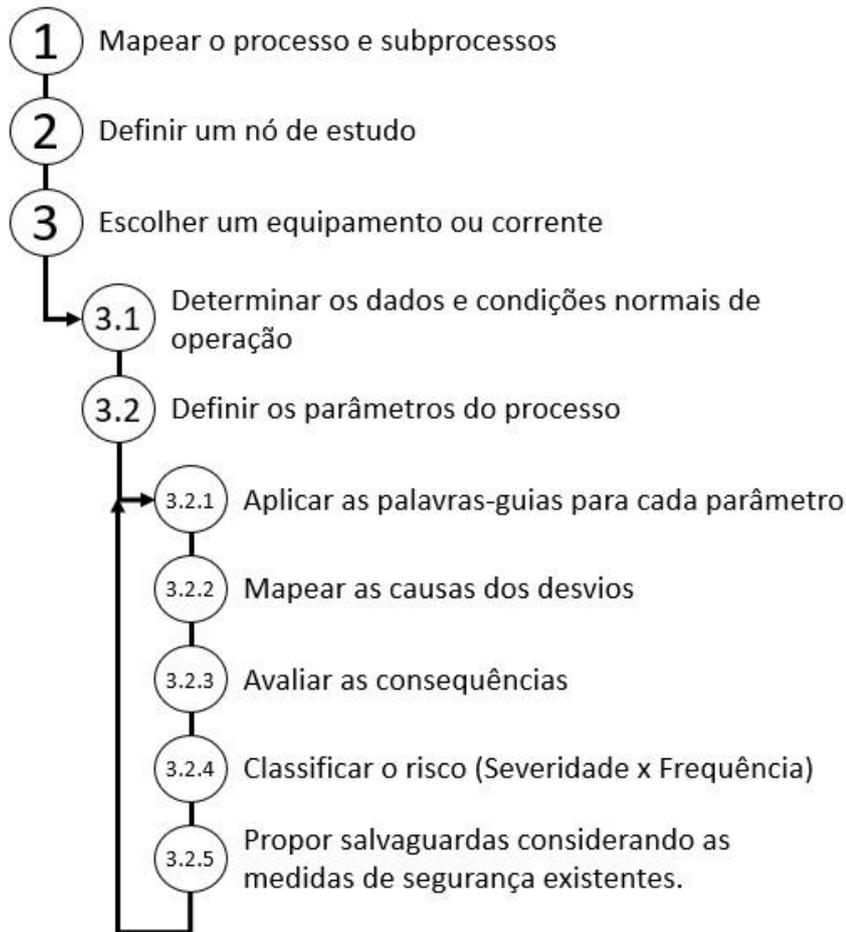


Figura 4.1. Sequência esquemática de HAZOP.

Fonte: Autoria própria, 2022.

A Figura 4.2 exemplifica o possível tratamento das informações levantadas ao longo de uma análise de HAZOP. Uma das etapas iniciais é coleta dos dados e condições normais de operação do equipamento ou corrente analisada. Uma vez que a HAZOP é uma análise que identifica desvios de processo, é necessário definir inicialmente qual é a intenção e a condição normal para então identificar tudo aquilo que foge ao padrão.

Além disso, é importante descrever as possíveis causas e consequências dos desvios analisados, em conversa com os integrantes presentes na análise de segurança, para documentar e justificar as salvaguardas propostas. Estas irão depender da classificação do risco com base na matriz de severidade e frequência empregada. Em casos de riscos muito elevados, as medidas de segurança adicionais poderão atuar reduzindo a severidade, a frequência ou ambas.

Processo Unidade de Produção de X
 Subprocesso Linha de Envase
 Nó Armazenamento de Produto Acabado
 Equipamento Tanque 01

| Dados do Equipamento: | Material | Pressão | Tempera | Volume |
|-----------------------|----------|---------|---------|------------------|
| | Aço Inox | 2 bar | 40 °C | 5 m ³ |

| Parâmetro | Palvra-guia | Causa | Consequência | Severidade | Frequência | Risco | Medidas Propostas |
|-------------|-------------|---|--|------------|------------|----------|------------------------------------|
| Temperatura | mais | Falha no fornecimento de fluido de refrigeração | Aumento da pressão interna podendo resultar em rompimento do vaso. | 5 | 2 | Moderado | Implementação de PSV no Tanque 01. |

Figura 4.2. Exemplo hipotético da análise de HAZOP.

Fonte: Aatoria própria, 2022.

4.2 Metodologia de grafos aplicados a HAZOP

A rotina de programação foi desenvolvida ao longo da elaboração do presente trabalho pelos professores André Alberton e Kese Alberton integrando os softwares VBA-Excel e SciLab devido aos pacotes especializados em grafos disponíveis para esta ferramenta. Por causa da quantidade de informação obtida da HAZOP, o programa é responsável por auxiliar na geração da matriz de adjacência a partir da relação entre as variáveis cadastradas.

Foram geradas tabelas em Excel cadastrando e categorizando cada parâmetro, desvio e efeito mencionados nas atas dos estudos de perigos e operabilidade. Uma vez cadastradas estas informações, foi possível efetuar a análise de grafos por meio da execução da rotina em Scilab.

Primeiramente, para buscar por inconsistências utilizando o software é necessário montar uma tabela relacionando cada variável com sua respectiva palavra-guia (exemplo: Pressão alta = P+). Além disso, é preciso definir quais efeitos são considerados opostos, ou seja, informar que mais (+) é oposto de menos (-) e, portanto, P+ é o inverso de P- e vice e versa. Uma interface foi criada em Excel VBA para evitar erros de digitação, como mostra a Figura 4.3.

| | A | B | C | D | E |
|----|----------|--------|---|--------------|--------|
| 1 | CAUSA | | | CONSEQUÊNCIA | |
| 2 | VARIÁVEL | EFEITO | | VARIÁVEL | EFEITO |
| 3 | DL | + | | L14F | + |
| 4 | DL | - | | L23F | - |
| 5 | L23F | - | | L15F | - |
| 6 | L15F | - | | C1aL | - |
| 7 | L23F | - | | L19F | - |
| 8 | L19F | - | | C2aL | - |
| 9 | L23F | - | | B1F | - |
| 10 | L23F | - | | B2F | - |
| 11 | L23F | - | | B3F | - |
| 12 | L23F | - | | B4F | - |
| 13 | DCT | ++ | | DL | - |
| 14 | DH | ++ | | DL | - |
| 15 | DFU | 0 | | DL | - |
| 16 | DL | - | | L23F | + |
| 17 | L23F | + | | L15F | + |
| 18 | L15F | + | | C1aL | + |
| 19 | C1aL | + | | L16 | + |
| 20 | L23F | + | | L19F | + |

| | A | B | C |
|---|-------------|------------|-------------|
| 1 | | | |
| 2 | PERTURBAÇÃO | é oposta à | PERTURBAÇÃO |
| 3 | + | | - |
| 4 | + | | -- |
| 5 | + | | 0 |
| 6 | ++ | | - |
| 7 | ++ | | -- |
| 8 | ++ | | 0 |

Figura 4.3. Fragmento da tabela de inserção de dados.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Dessa forma, o software reconhece cada par como um vértice, assumindo que a relação com sua consequência é uma aresta direcionada. A partir dessa interpretação e com base nas definições de efeitos opostos, a rotina é capaz de montar a matriz de adjacências e mapear os feixes transitivos diretos visando identificar sequências suspeitas. Essa representação matricial dos grafos contém a informação se um vértice v_x está ligado a outro v_y .

Basicamente, a rotina computacional irá partir de um grafo já existente. Ela utilizará um vértice inicial e fará uma busca de todos os “caminhos” (sequências) deste vértice até encontrar um vértice final ou obter uma sequência suspeita (efeitos contrários numa mesma

sequência, conforme Figura 4.5). Assim sendo, todos os caminhos que levam à efeitos opostos serão armazenados para posterior análise.

A metodologia utilizada difere da metodologia citadas nos trabalhos anteriores, onde foi usado a função cyclobasis gerando ciclos suspeitos e armazenando grande quantidade de resultados. Na rotina atual, os vértices os quais já foram analisados e apresentam caminhos com efeitos opostos são armazenados e ele segue a busca para novos vértices, impedindo duplicidade de resultados, conforme ilustrado na figura 4.4.

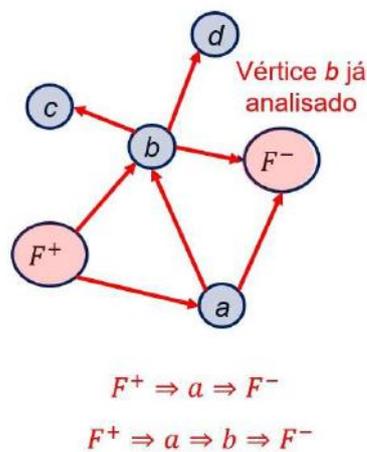


Figura 4.4. Identificação de sequências suspeitas através da rotina computacional.

Fonte: Autoria própria, 2022.

A Figura 4.55 ilustra exemplos de sequências suspeitas de inconsistências.

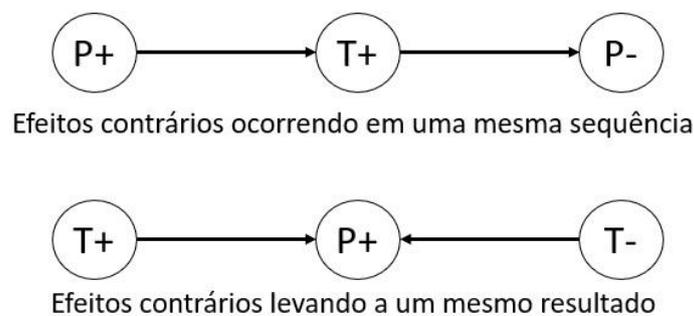


Figura 4.5. Exemplos de sequências suspeitas de inconsistências.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Ao se identificar um efeito oposto em um mesmo feixe transitivo direto, a rotina é capaz de registrar qual a sequência suspeita, ilustrar de forma gráfica a ordem que a originou e mostrar sua causa raiz.

De posse do relatório, as sequencias de eventos que contém aparentes inconsistências serão submetidas à análise criteriosa, procurando-se identificar quais relações propostas podem ter levado à tais inconsistências.

4.3 Estudo de caso 1: Planta de produção de ácido nítrico

A primeira HAZOP foi retirada do livro *Chemical Engineering Design* apresentada uma unidade de ácido nítrico genérica, apresentada pela Figura 4.6, antes de realização da HAZOP. O autor se propõe a destacar as alterações que foram realizadas após a análise de segurança e disponibiliza a ata da HAZOP, a qual contém o desvio, causa e consequência.

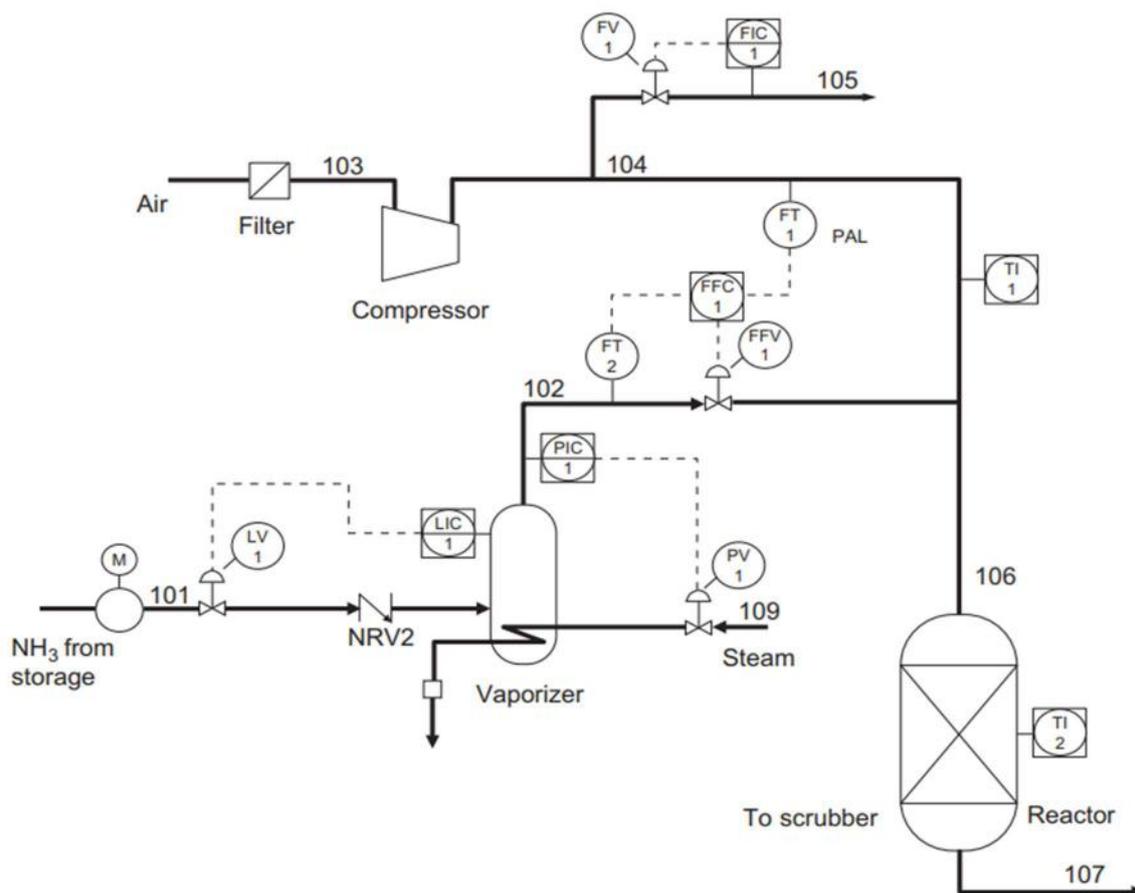


Figura 4.6. Case 1 – fluxograma de Processo, antes de realização da HAZOP.

Fonte: TOWLER & SINNOT, 2013.

Embora o exemplo estudado seja uma unidade relativamente pequena, foram criados códigos específicos para cada desvio, palavra-chave e elemento da planta analisada para facilitar a organização e interpretação dos dados conforme mencionado anteriormente.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresente os índices cadastrados para o estudo de caso 1.

| <u>Equip/Linha</u> | <u>Índice</u> | <u>Equip/Linha</u> | <u>Índice</u> |
|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| Reator | R | Corrente 104 | L104 |
| Compressor | K | Corrente 105 | L105 |
| Vaporizador | V | Corrente 106 | L106 |
| Corrente 101 | L101 | Corrente 107 | L107 |
| Corrente 102 | L102 | Corrente 108 | L108 |
| Corrente 103 | L103 | Corrente 109 | L109 |
| <u>Desvios</u> | <u>Índice</u> | <u>Desvios</u> | <u>Índice</u> |
| Pressão | P | Viscosidade | V |
| Nível | L | pH | H |
| Temperatura | T | Agitação | A |
| Fluxo | F | Falha Utilidades | FU |
| Concentração | C | Falha Mecânica | M |
| Erro na Fonte | EF | Vazamento | Z |
| Erro no Destino | ED | Risco de Explosão | RX |
| Contaminação | CT | | |
| <u>Efeitos</u> | | <u>Índice</u> | |
| Mais | | + | |
| Menos | | - | |
| Nulo | | 0 | |
| Aum. Gradativo | | ++ | |
| Red. Gradativa | | -- | |
| Reverso | | r | |

Tabela 4.1. Índices cadastrados: caso 1.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Após a definição dos códigos de cada parâmetro, a HAZOP foi reescrita aplicando-se os índices apresentados na tabela acima. Essa etapa foi realizada por meio do Microsoft Excel, uma vez que existe compatibilidade com Scilab, evitando que seja necessária a construção manual da matriz de adjacências na rotina de programação.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos para a análise HAZOP como a metodologia proposta para o caso 1. A planilha de Excel foi elaborada listando e

classificando cada item identificado na análise a partir da união dos códigos já estabelecidos. Sendo assim, tomando a primeira linha da Tabela 4.2 como exemplo, o fluxo nulo na linha 101 tem como consequência a diminuição do nível no vaporizador (L101F0 → VL-).

| CAUSA | | CONSEQUÊNCIA | |
|----------|--------|--------------|--------|
| VARIÁVEL | EFEITO | VARIÁVEL | EFEITO |
| L101F | 0 | VL | - |
| L101F | - | VL | - |
| L101F | + | VL | + |
| L102F | 0 | RL | - |
| L102F | 0 | RC | - |
| L102F | - | RL | - |
| L102F | - | RC | - |
| L102L | - | RL | - |
| L102L | - | RC | - |
| L102F | + | RC | + |
| L102F | + | RL | + |
| L102L | + | RC | + |
| L102L | + | RL | + |
| L102F | r | VC | + |
| L103F | - | RC | + |
| L104F | 0 | RC | + |
| L104F | + | RT | + |
| L104F | r | KC | + |
| L106F | 0 | RT | - |
| L106F | - | RT | - |
| L106C | - | RT | - |
| L106F | + | RT | + |
| L106C | + | RT | + |
| L109F | 0 | VL | + |

Tabela 4.2. Mapeamento da análise de HAZOP: caso 1.

Fonte: Autoria própria, 2022.

4.4 Estudo de caso 2: Planta de geração de vapor

A unidade em si corresponde ao sistema de geração de vapor de uma indústria real e, por razões de confidencialidade e integridade de dados, não serão mencionados os dados da empresa ou qualquer informação que possa associá-la ao presente trabalho.

Na Figura 4.7 descreve-se o fluxograma de processo do estudo de caso 2. As identificações dos equipamentos foram descaracterizadas e devido à complexidade do

desenho, as linhas foram simplificadas de modo a manter-se somente as principais e aquelas avaliadas na HAZOP. A malha de instrumentação não foi representada, uma vez que não é objetivo do presente trabalho refazer a análise de segurança, tampouco propor salvaguardas ou medidas de segurança adicionais. Os índices desse caso encontram-se listados Tabela 4.3.

| Equip/Linha | Índice | Equip/Linha | Índice |
|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| Desaerador | D | Corrente 6 | L6 |
| Caldeira 1 (água) | C1a | Corrente 7 | L7 |
| Caldeira 2 (água) | C2a | Corrente 8 | L8 |
| Caldeira 1 (gás) | C1g | Corrente 9 | L9 |
| Caldeira 2 (gás) | C2g | Corrente 10 | L10 |
| Tanque Purga | TP | Corrente 11 | L11 |
| Bomba 1 | B1 | Corrente 12 | L12 |
| Bomba 2 | B2 | Corrente 13 | L13 |
| Bomba 3 | B3 | Corrente 14 | L14 |
| Bomba 4 | B4 | Corrente 15 | L15 |
| Tanque Dosagem | TD | Corrente 16 | L16 |
| Coletor 1 | COL1 | Corrente 17 | L17 |
| Coletor 2 | COL2 | Corrente 18 | L18 |
| Corrente 1 | L1 | Corrente 19 | L19 |
| Corrente 2 | L2 | Corrente 20 | L20 |
| Corrente 3 | L3 | Corrente 21 | L21 |
| Corrente 4 | L4 | Corrente 22 | L22 |
| Corrente 5 | L5 | Corrente 23 | L23 |
| Desvios | Índice | Desvios | Índice |
| Pressão | P | Viscosidade | V |
| Nível | L | pH | H |
| Temperatura | T | Agitação | A |
| Fluxo | F | Falha Utilidades | FU |
| Concentração | C | Falha Mecânica | M |
| Erro na Fonte | EF | Vazamento | Z |
| Erro no Destino | ED | Risco de Explosão | RX |
| Contaminação | CT | | |
| Efeitos | | Índice | |
| Mais | | + | |
| Menos | | - | |
| Nulo | | 0 | |
| Aum. Gradativo | | ++ | |
| Red. Gradativa | | -- | |
| Reverso | | r | |

Tabela 4.3. Índices cadastrados: caso 2.

Fonte: Autoria própria, 2022.

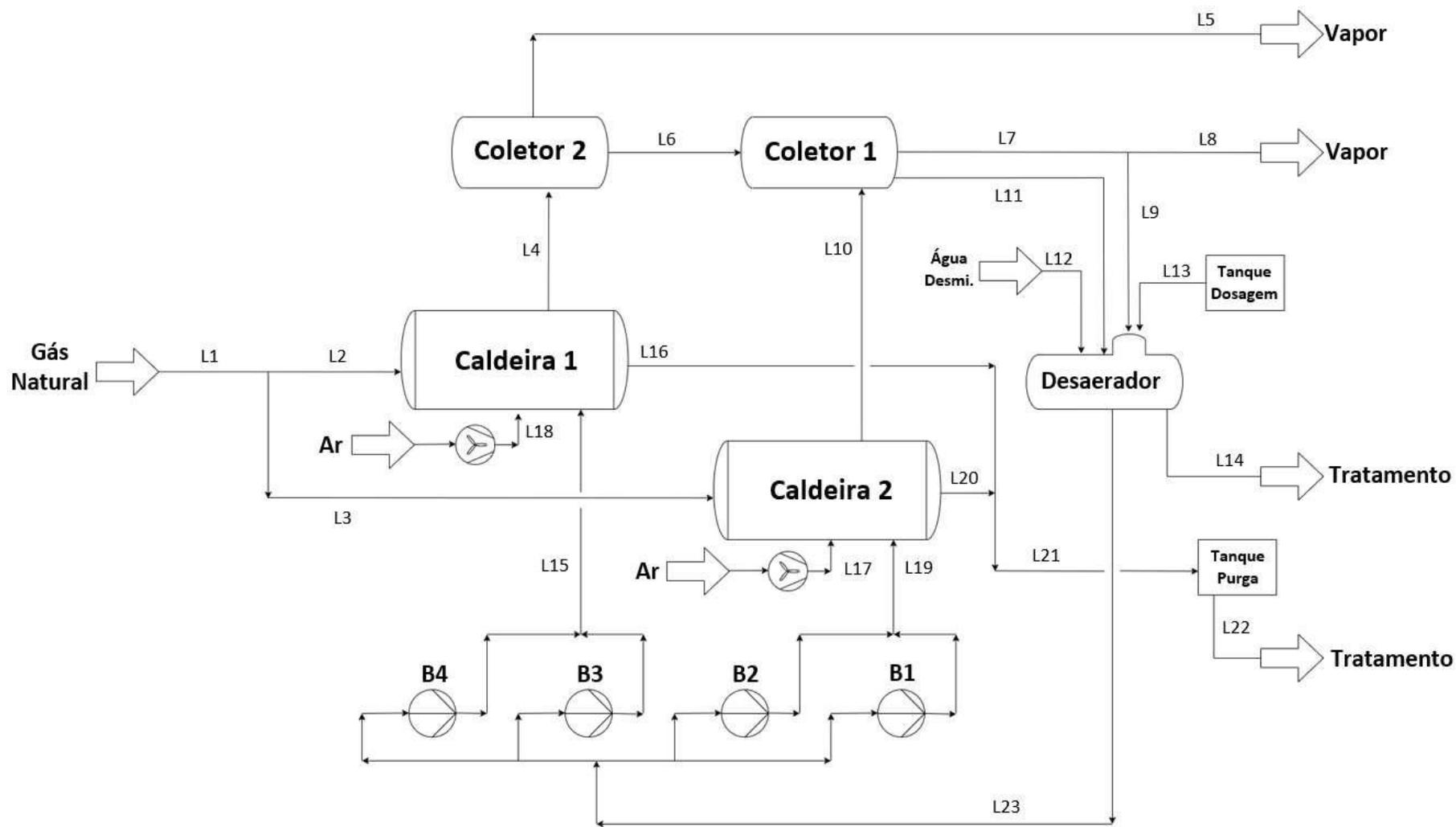


Figura 4.7. Caso 2 - fluxograma de processo simplificado: sistemas de caldeiras de uma planta real.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Para caso 2, o sistema de vapor foi dividido em um número consideravelmente maior de nós, cada um com diversas linhas e equipamentos, inclusive distinguindo o lado da água e do gás da caldeira flamotubular. O par efeito e consequência foi interpretado do relatório final da mesma forma realizada para o caso 1. Entretanto, as sequências de eventos entre o desvio da condição de operação e a perturbação constatada foram preenchidos quando não mencionados na HAZOP, a fim de garantir uma visão mais completa do que estava sendo considerado, uma vez que a dimensão do sistema torna possível, por exemplo, que a variação de um parâmetro na caldeira tenha um impacto nas bombas de alimentação, interligadas por diversas correntes e equipamentos. A partir da leitura da ata e do cadastro dos índices, construiu-se a tabela de causa e consequência, como mostra a Tabela 4.4.

| CAUSA | | CONSEQUÊNCIA | | CAUSA | | CONSEQUÊNCIA | |
|----------|--------|--------------|--------|----------|--------|--------------|--------|
| VARIÁVEL | EFEITO | VARIÁVEL | EFEITO | VARIÁVEL | EFEITO | VARIÁVEL | EFEITO |
| DL | + | L14F | + | C1aED | ++ | L10F | r |
| DL | - | L23F | - | L10F | r | C2aT | + |
| L23F | - | L15F | - | TDCT | ++ | C1aCT | ++ |
| L15F | - | C1aL | - | L2F | - | C1aT | - |
| L23F | - | L19F | - | C1aT | - | C1aP | - |
| L19F | - | C2aL | - | C1aP | - | L4F | - |
| L23F | - | B1F | - | C1gP | + | C1gZ | ++ |
| L23F | - | B2F | - | C1gZ | ++ | C1gRX | ++ |
| L23F | - | B3F | - | C1gP | - | L4P | - |
| L23F | - | B4F | - | C1gP | - | C1gZ | ++ |
| DCT | ++ | DL | - | B1P | + | B1T | + |
| DH | ++ | DL | - | B2P | + | B2T | + |
| DFU | 0 | DL | - | B1P | + | B1F | 0 |
| DL | - | L23F | + | B2P | + | B2F | 0 |
| L23F | + | L15F | + | B1P | - | L23F | - |
| L15F | + | C1aL | + | B2P | - | L23F | - |
| C1aL | + | L16 | + | B1P | - | B1Z | ++ |
| L23F | + | L19F | + | B2P | - | B2Z | ++ |
| L19F | + | C2aL | + | B1T | + | B1P | + |
| C2aL | + | L20F | + | B2T | + | B2P | + |
| L16F | + | L21F | + | B1T | + | B1F | 0 |
| L21F | + | TPL | + | B2T | + | B2F | 0 |
| DM | ++ | DL | - | B1F | - | B1Z | ++ |
| DZ | ++ | DL | - | B2F | - | B2Z | ++ |
| TDL | - | DCT | ++ | B1Z | ++ | B1F | 0 |
| L13F | + | DCT | ++ | B2Z | ++ | B2F | 0 |
| TDCT | ++ | DCT | ++ | B1F | - | L19F | - |

Tabela 4.4. Mapeamento da análise de HAZOP: caso 2.

Fonte: Autoria própria, 2022.

| | | | | | | | |
|------|----|------|----|-------|----|-------|----|
| TDFU | ++ | L13F | - | B2F | - | L19F | - |
| TDM | ++ | L13F | - | L19F | - | C2aL | - |
| L13F | - | DCT | ++ | B1F | r | L23F | r |
| TDZ | ++ | TDL | - | B2F | r | L23F | r |
| B3P | + | B3T | + | L23F | r | DT | + |
| B4P | + | B4T | + | B1F | + | L19F | + |
| B3P | + | B3F | 0 | B2F | + | L19F | + |
| B4P | + | B4F | 0 | L19F | + | C2aL | + |
| B3P | - | L23F | - | C2aP | + | C2aZ | ++ |
| B4P | - | L23F | - | C2aZ | ++ | C2aL | - |
| B3P | - | B3Z | ++ | C2aZ | ++ | L10F | - |
| B4P | - | B4Z | ++ | C2aZ | ++ | L10P | - |
| B3T | + | B3P | + | C2aP | - | L10P | - |
| B4T | + | B4P | + | C2aP | - | C2aZ | ++ |
| B3T | + | B3F | 0 | C2aL | + | L10F | - |
| B4T | + | B4F | 0 | C2aL | - | C2aT | + |
| B3F | - | B3Z | ++ | C2aT | + | C2aP | + |
| B4F | - | B4Z | ++ | C2aP | + | C2aZ | ++ |
| B3Z | ++ | B3F | 0 | C2aT | - | C2aP | - |
| B4Z | ++ | B4F | 0 | C2aP | - | C2aT | - |
| B4F | - | L15F | - | C2aF | r | C2aT | + |
| B3F | - | L15F | - | C2aF | r | C2aP | + |
| L15F | - | C1aL | - | C2aP | - | L10F | r |
| B3F | r | L23F | r | L10F | r | C2aF | r |
| B4F | r | L23F | r | C2aED | ++ | L4F | r |
| L23F | r | DT | + | L4F | r | C1aT | + |
| C1aP | + | C1aZ | ++ | TDCT | ++ | C2aCT | ++ |
| C1aZ | ++ | C1aL | - | L3F | - | C2aT | - |
| C1aZ | ++ | L4F | - | C2aT | - | C2aP | - |
| C1aZ | ++ | L4P | - | C2aP | - | L10F | - |
| C1aP | - | L4P | - | C2gP | + | C2gZ | ++ |
| C1aP | - | C1aZ | ++ | C2gZ | ++ | C2gRX | ++ |
| C1aL | + | L4F | - | C2gP | - | L10P | - |
| C1aL | - | C1aT | + | C2gP | - | C2gZ | ++ |
| C1aT | + | C1aP | + | COL1P | + | L8Z | ++ |
| C1aP | + | C1aZ | ++ | COL1P | - | L7P | - |
| C1aT | - | C1aP | - | L7P | - | L8P | - |
| C1aP | - | C1aT | - | L7P | - | L8P | - |
| C1aF | r | C1aT | + | COL1Z | ++ | COL1P | - |
| C1aF | r | C1aP | + | COL2P | - | L5P | - |
| C1aP | - | L4F | r | COL2Z | ++ | COL2P | - |
| L4F | r | C1aF | r | | | | |

Tabela 4.4. Mapeamento da análise de HAZOP: caso 2.

Fonte: Autoria própria, 2022.

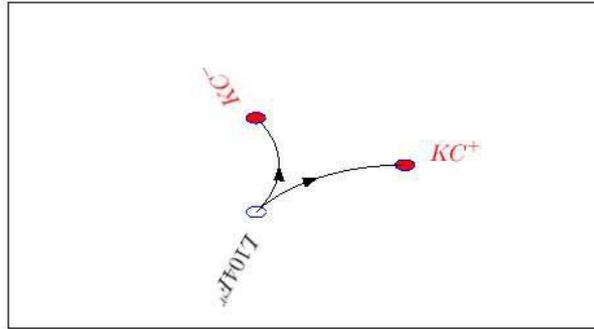
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A rotina de programação detecta as inconsistências da HAZOP por meio da análise da matriz de adjacências e o conceito de grafos orientados. São exemplos de sequências suspeitas aquelas em que a perturbação de um parâmetro resulta em consequências opostas, ou efeitos opostos causando o mesmo resultado. Devido à complexidade das relações de causa e efeito, algumas sequências podem se tornar extremamente longas e difíceis de detectar a origem da inconsistência. Portanto, para melhor visualização, foi adicionada uma função para gerar as imagens dos feixes transitivos de maneira a focar no trecho principal, ou seja, aquele que detém a sequência suspeita.

5.1 Estudo de caso 1 – Planta de ácido nítrico

Inicialmente, ao executar a rotina para o primeiro estudo de caso não foram encontradas inconsistências. De fato, não era esperado um resultado diferente por se tratar de um exemplo didático e simples, que possui apenas 24 desvios analisados contra 137 do caso real envolvendo o sistema de vapor. Entretanto, devido ao seu tamanho enxuto, a ata da planta de produção de ácido nítrico foi de extrema importância para o desenvolvimento da rotina de programação, assim como seu ajuste e correção de erros. A metodologia empregada depende, nas etapas iniciais, de um esforço manual para a avaliação da HAZOP e o cadastro das relações de causa e efeito. Portanto, o exemplo estudado além de validar a ferramenta também facilitou o seu desenvolvimento.

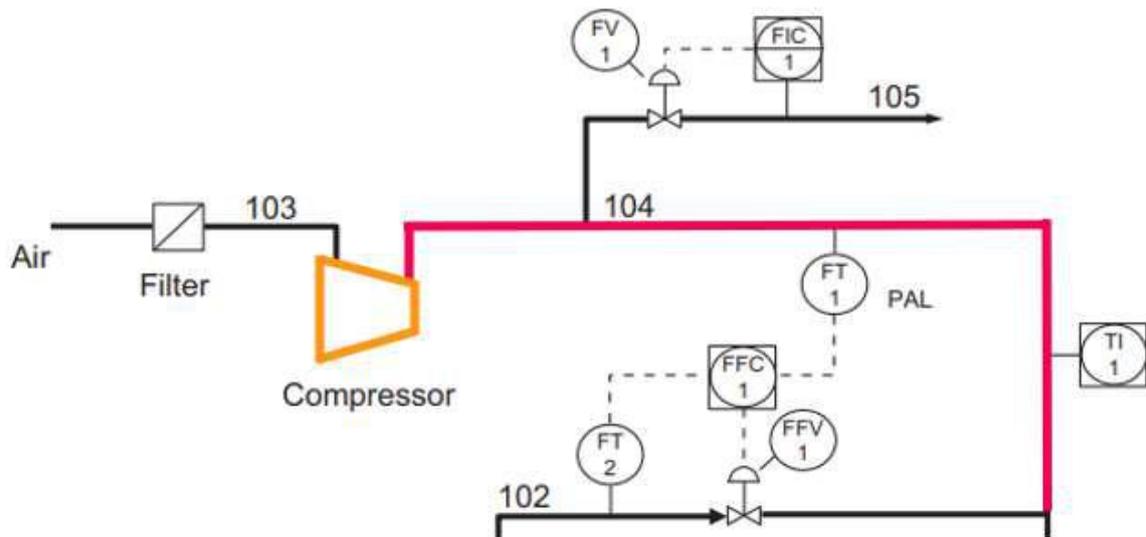
Embora não seja objetivo do presente trabalho realizar ou refazer a HAZOP, foi incluída na tabela do primeiro caso uma modificação que corresponde a uma inconsistência. A alteração proposital da análise teve como objetivo testar a construção da matriz de adjacências pela rotina de programação e a identificação de um mesmo vértice de um grafo orientado para dois vértices opostos.



$$KC^+ \leftarrow L104F^r \Rightarrow KC^-$$

Figura 5.1. Inconsistência inserida de forma proposital.

Fonte: Autoria própria, 2022.



Legenda:

L104 = Corrente 104

K = Compressor

Fr = Fluxo Reverso

C+ = Concentração alta

C- = Concentração baixa

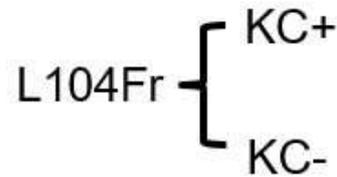


Figura 5.2. Representação da inconsistência no fluxograma.

Fonte: Autoria própria, 2022.

A metodologia foi capaz de identificar a relação contrária entre os efeitos da variação de concentração de amônia no compressor (KC+ / KC-) e, associando à mesma causa de fluxo reverso na corrente 104 (L104Fr), alertar para o possível erro na análise.

5.2 Estudo de caso 2 – Planta de geração de vapor

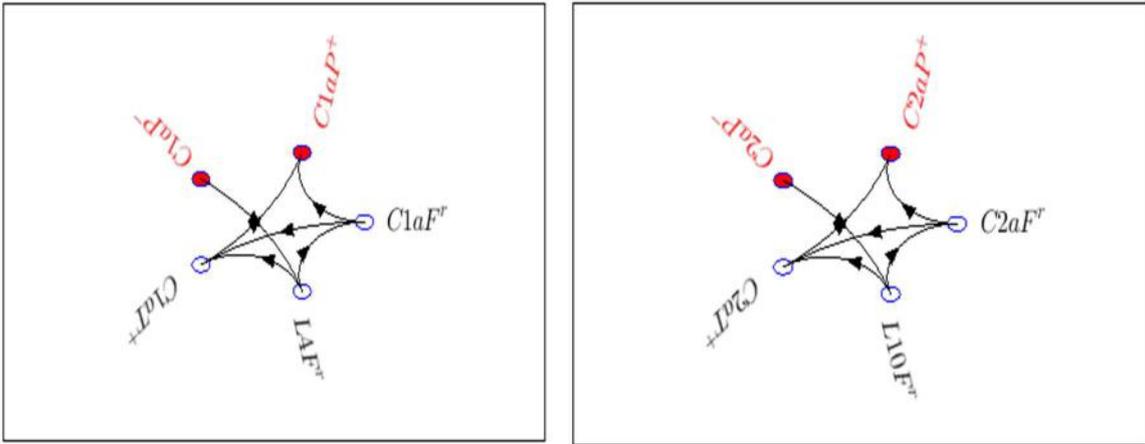
Ao todo, o programa foi capaz de detectar 10 inconsistências suspeitas com base na tabela de causa e consequência gerada no Microsoft Excel. Entretanto, o processo estudado corresponde ao sistema de geração de vapor de uma planta industrial e possui duas caldeiras, que operam na maioria das vezes como *backup* uma da outra. Esse fato, acrescido da semelhança técnica entre os dois equipamentos, gerou uma análise de HAZOP análoga para os dois equipamentos, de modo que ambos os nós da Caldeira 1 e Caldeira 2 possuem os mesmos desvios analisados. Portanto, as 10 inconsistências suspeitas correspondem na realidade a 5 sequências idênticas para cada um dos equipamentos mencionados.

5.2.1 Redução da pressão ocasionando seu aumento no mesmo equipamento.

A Figura 5.3 ilustra as sequências identificadas como suspeitas pela rotina do Scilab. O primeiro trecho corresponde à diminuição da pressão da caldeira lado água gerando um fluxo reverso na linha de vapor. Com base na ata da HAZOP, uma pressão baixa na caldeira poderia resultar no fornecimento de vapor abaixo da pressão desejada para a planta, no colapso do equipamento ou no retorno do vapor proveniente do coletor caso a Caldeira 2 estivesse em operação ao mesmo tempo.

Em seguida, tem-se o fluxo reverso na Caldeira lado água ou o aumento da temperatura na Caldeira lado água como consequência do fluxo reverso na linha de vapor. Ambos são devido ao retorno de vapor superaquecido ao equipamento.

Por fim, foi analisado na HAZOP que o aumento da temperatura da caldeira associado a não imersão dos tubos de gás durante a partida resultaria na calefação do líquido gerando um brusco aumento de pressão interna.



$$\begin{aligned}
 C1aP^- &\Rightarrow L4F^+ \Rightarrow C1aF^+ \Rightarrow C1aP^+ \\
 C1aP^- &\Rightarrow L4F^+ \Rightarrow C1aT^+ \Rightarrow C1aP^+
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C2aP^- &\Rightarrow L10F^+ \Rightarrow C2aF^+ \Rightarrow C2aP^+ \\
 C2aP^- &\Rightarrow L10F^+ \Rightarrow C2aT^+ \Rightarrow C2aP^+
 \end{aligned}$$

(a) Nó da Caldeira 1, lado água.

(b) Nó da Caldeira 2, lado água.

Figura 5.3. Inconsistência de pressão baixa resultando em pressão alta.

Fonte: Autoria própria, 2022.

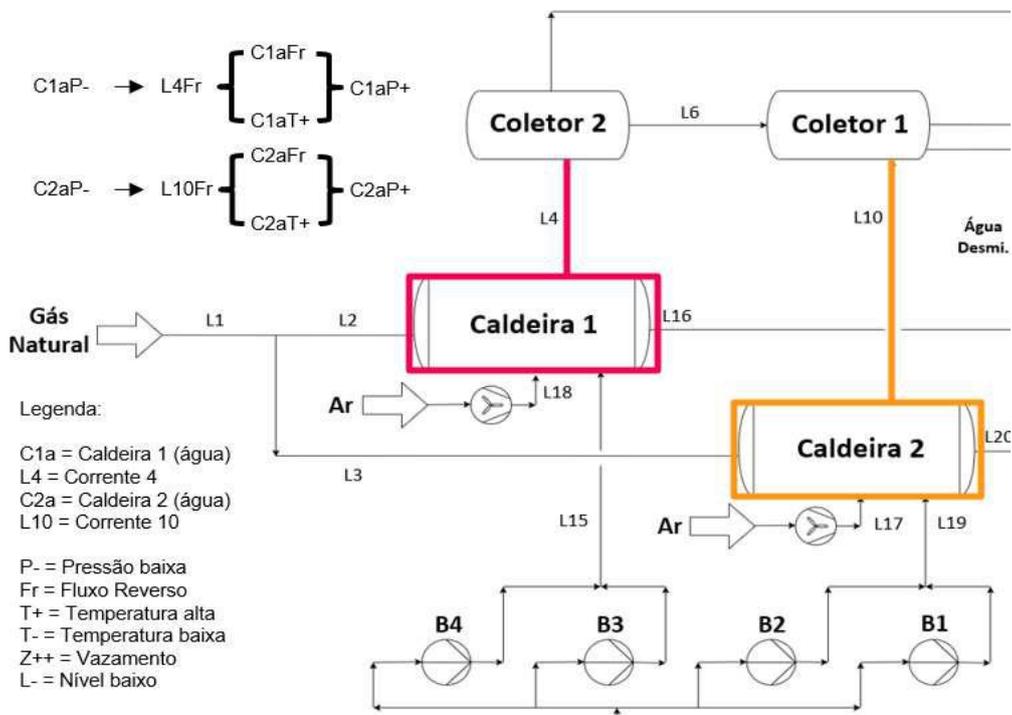


Figura 5.4. Inconsistência de pressão baixa resultando em pressão alta representada no fluxograma

Fonte: Autoria própria, 2022.

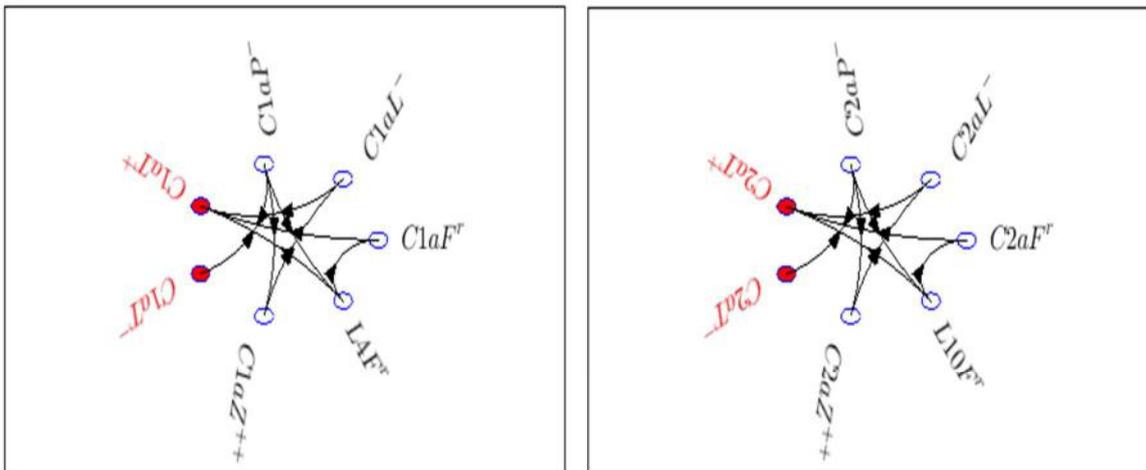
5.2.2 Redução da temperatura ocasionando seu aumento no mesmo equipamento.

A ferramenta também foi capaz de encontrar 3 sequências, conforme apresentado na Figura 5.5, nas quais a diminuição da temperatura resulta no aumento da mesma. A primeira é o resultado direto do esfriamento da caldeira, uma vez que o vapor é um gás e essas duas propriedades são diretamente proporcionais, dessa forma diminuindo a pressão.

Assim como elucidado anteriormente, foi analisada a possibilidade de fluxo reverso na linha de vapor no caso de uma possível pressão baixa em uma das caldeiras enquanto a outra estivesse em operação. Além disso, é citado o possível colapso do equipamento resultando em vazamento externo.

A relação do fluxo reverso e a temperatura alta se dá pelo retorno de vapor superaquecido, que também resulta em fluxo reverso na própria caldeira.

O vazamento externo tem como principal efeito a diminuição do nível de líquido no reservatório e, dependendo do grau, pode propiciar a rápida vaporização da água ao entrar em contato com os tubos de gás expostos, aumentando bruscamente a pressão e temperatura.



$$\begin{aligned}
 &C1aT^- \Rightarrow C1aP^- \Rightarrow LAF^r \Rightarrow C1aT^+ \\
 &C1aT^- \Rightarrow C1aP^- \Rightarrow C1aZ^{++} \Rightarrow C1aL^- \Rightarrow C1aT^+ \\
 &C1aT^- \Rightarrow C1aP^- \Rightarrow LAF^r \Rightarrow C1aF^r \Rightarrow C1aT^+
 \end{aligned}$$

(a) Nó da Caldeira 1, lado água.

$$\begin{aligned}
 &C2aT^- \Rightarrow C2aP^- \Rightarrow L10F^r \Rightarrow C2aT^+ \\
 &C2aT^- \Rightarrow C2aP^- \Rightarrow C2aZ^{++} \Rightarrow C2aL^- \Rightarrow C2aT^+ \\
 &C2aT^- \Rightarrow C2aP^- \Rightarrow L10F^r \Rightarrow C2aF^r \Rightarrow C2aT^+
 \end{aligned}$$

(b) Nó da Caldeira 2, lado água.

Figura 5.5. Inconsistência de temperatura baixa resultando em temperatura alta.

Fonte: Autoria própria, 2022.

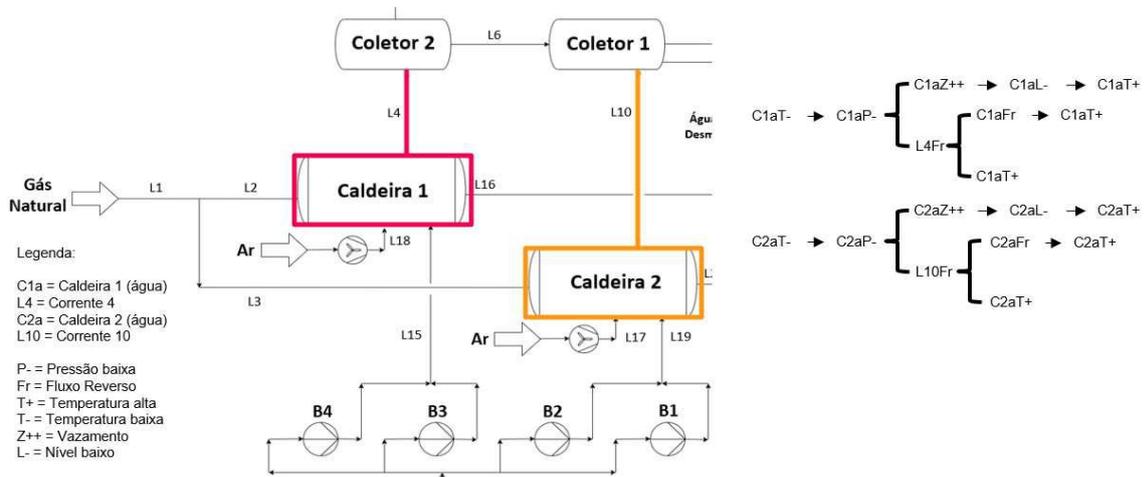


Figura 5.6. Inconsistências de temperatura representadas no fluxograma das caldeiras.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Pode-se perceber com base nas Figuras 5.4 e 5.5, que os eventos, embora tenham conexão entre si, dependem de acontecimentos que ocorrem em cadeia ou de situações muito específicas.

Em relação ao desvio de pressão, a diminuição e o aumento dessa variável de fato foram analisados em um mesmo fecho transitivo direto, porém em instantes diferentes. A pressão baixa só poderá permitir um fluxo reverso na corrente 4 se ambas as caldeiras estiverem em operação. A partir de tal ponto, o aumento da temperatura e da pressão serão consequências do retorno de vapor superaquecido.

O início do fecho envolvendo a temperatura é bem similar ao da pressão e a mesma análise de cronologias diferentes se aplica nesses casos. Além disso, na sequência envolvendo o vazamento (Z++), o aumento da temperatura está associado ao restabelecimento do volume de água após um desvio de nível baixo e o contato do líquido com a tubulação quente de gás. Entretanto, esse desvio é impossível de acontecer nessa situação, considerando que o equipamento foi colapsado por pressão baixa.

Portanto, embora sejam sequências suspeitas, as inconsistências identificadas não correspondem a erros de análise da HAZOP.

6 CONCLUSÕES

Embora a metodologia do estudo de perigos e operabilidade (HAZOP) utilize da divisão do processo em nós, é fundamental que o engenheiro de segurança tenha meios de avaliar o sistema como um todo, conectando os desvios de cada equipamento e verificando se há sobreposições conceituais que na prática não fazem sentido.

A rotina computacional que foi desenvolvida ao longo deste trabalho utilizando o SciLab, conseguiu detectar uma inconsistência que foi colocada de modo proposital para o primeiro estudo de caso analisado, já que inicialmente a planta de ácido nítrico que foi utilizada da literatura, não apresentou quaisquer inconsistências quando o programa foi rodado. Já para o segundo estudo de caso, a rotina conseguiu detectar ao todo, dez inconsistências presentes na planta de geração de vapor, proveniente do sistema de geração de vapor, sendo cinco para a primeira caldeira e cinco para a segunda, onde ambas apresentaram os mesmos tipos de inconsistências.

Diante dos resultados obtidos, conseguimos comprovar a funcionalidade da ferramenta utilizada, em que as matrizes de adjacência obtidas para cada estudo de caso e aplicadas a teoria de grafos, quando utilizadas na rotina computacional, trouxeram resultados satisfatórios ao identificar efeitos opostos em um mesmo fecho transitivo direto.

Vale frisar que a ferramenta não substitui o papel do engenheiro e da equipe multidisciplinar na execução da HAZOP. Ela se presta a corroborar e complementar os resultados, podendo ser utilizada ao longo do desenvolvimento da HAZOP ou ao final. Além disso, é de bastante importância deixar claro que a ferramenta é extremamente simples, não necessitando de quaisquer expertises para a sua utilização, onde a análise pode ser empregada no decorrer ou após o estudo da HAZOP. A ferramenta empregada é intelegível, podendo ser utilizada por qualquer membro da equipe que consiga estabelecer as relações de causa/efeito, diferente de outras análises como a AQR, a exemplo, em que se faz necessário o uso de simulação dinâmica, necessitando de pessoal qualificado e demandando tempo para sua execução.

Nos casos estudados neste trabalho de conclusão de curso as inconsistências obtidas não foram erros e puderam ser justificadas mediante a análise criteriosa dos eventos associados. A ferramenta serviu para cadastrar os desvios, os nós e as consequências ao longo da HAZOP.

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Englobar a ferramenta em um dos softwares existentes, melhorando a interface que integra o banco de dados da HAZOP ao pacote computacional a fim de agilizar a introdução dos dados pelo usuário.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTON, Andre. L. **Uma metodologia para auxiliar no gerenciamento de riscos e na seleção de alternativas de investimentos em segurança**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade de Santa Catarina, 1996.

ALBERTON, Andre. L. **Material de aula da disciplina de métodos matemáticos**. Programa de Pós-graduação, Instituto de Química/UERJ, Rio de Janeiro, 2020a.

ALBERTON, Kese. P. F. **Segurança de Processos e Prevenção de Perdas: Apostila de Segurança de Processos e Prevenção de Perdas**. Graduação, Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2020b.

BETHEA, R. M. **Explosion and fire at the Phillips company Houstonchemical complex, Pasadena, TX**, Louisiana State Minerals Processing Research Institute (MPRI), Baton Rouge, Louisiana, 1997.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **Normas Regulamentadoras – NR**. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs>>. Acesso em: 18 de fev. de 2022.

CARDELLA, B. **Segurança no Trabalho e Prevenção de Acidentes: Uma Abordagem Holística**. São Paulo: Atlas, 2016.

CATAI, R. E. **Ferramentas de Gerência de Riscos: Apostila elaborada para o Curso de Engenharia de Segurança do Trabalho**. UTFPR, Curitiba, PR, 2012

CCPS (Center for Chemical Process Safety). **Guidelines for Hazard Evaluation Procedures**, 3ª Edição, New York: Wiley – AIChE, 2008.

CHARTRAND, G.; LESNIAK, L. **Graphs & Digraphs**. Editora CRC Press, 2004.

CHINAQUI, E. F. **Análise e Gerenciamento de Riscos de Processo na Indústria Química**. Monografia (Graduação em Engenharia Química), Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2012.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. L. **Segurança de Processos Químicos – Fundamentos e Aplicações**, 3ª Edição, GEN Ltc, 2015.

COUPER, J. R.; PENNEY, W. R.; FAIR, J. R.; WALAS, S. M. **Chemical Process Equipment – Selection and Design**, 2ª Edição, Elsevier, 2004.

GOLDBERG, M.; GOLDBERG, E. **Grafos: conceitos, algoritmos e aplicações**, 1ª Edição, Elsevier, 2012.

GOMES, R. O.; MATTIODA, R. A. **Técnicas de Prevenção e Controle de Perdas em Segurança do Trabalho – Um ajuste ao PDCA**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte, 2011.

GUILHERME, G. D. **Utilização de ferramentas computacionais para avaliação de estudos de HazOp**. 2018. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

GUILHERME, G. D.; ELIAS, L. P.; NASCIMENTO, C. F.; ALBERTON, A. L. **Heurísticas de HazOp analisada por grafos: Estudos de caso**, In: . São Paulo: Blucher, 2018.

GONÇALVES, D. R. **Um Estudo Introdutório da Teoria de Grafos Através de Matrizes**. Dissertação (Mestrado em Matemática), Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014.

GROSS, J.; YELLEN, J. **Graph Theory and Its Applications**, CRC Press, Boca Raton, 1999.

ISOGRAPH. **The study records are the cornerstone of any HAZOP study**. 2022. Disponível em: <<https://www.isograph.com/software/hazop/study-records/>>. Acesso em: 19 fev. 2022.

JOSEPH, G.; KASZNIAK, M.; LONG, L. **Lessons After Bhopal: CSB a catalyst for change**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 18, p. 537-548, 2005.

KING, R.; HIRST, R. **King's Safety in the Process Industries**, 2ª Edição, Londres, 1998.

KLETZ, T. **O Que Houve de Errado? Casos de Desastres em Plantas de Processo e como Eles Poderiam Ter Sido Evitados**, 5ª Edição, Editora Interciência, 2013.

NOLAN, D. P. Application of HAZOP and What-If safety reviews to the petroleum, petrochemical & chemical industries. New Jersey, U.S.A.: Noyes Publications, 1994.

ROSSING, N. L.; LIND, M.; JENSEN, N.; JØRGENSEN, S. B. **A goal-based methodology for HAZOP analysis**. Int J Nuc Saf Simul, 2010.

SPHERA. **Process Hazard Analysis (PHA-Pro) & HAZOP Software**. 2022. Disponível em: <<https://spha.com/pha-pro-software/>>. Acesso em: 19 fev. 2022.

SHREVE, R. N.; BRINK Jr., J. A. **Indústrias de Processos Químicos**, 4ª Edição, Guanabara Dois, 1977.

SOUZA, G. R.; LIMA, P. A.; LIMA, A.B.G. **Gestão de Desempenho em Segurança de Processo: Estudo de caso em uma empresa de energia**, Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção, 2013.

TOWLER, G. P.; & SINNOTT, R. K. **Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design**, 2ª Edição, 2013.