UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÂO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEONARDO DE AGUIAR DUARTE RIBEIRO

IDENTIFICAÇÃO DE PERIGO ATRAVÉS DOS DIAGRAMAS ÚNICOS E CONTÍNUOS

Recife
2019

LEONARDO DE AGUIAR DUARTE RIBEIRO

IDENTIFICAÇÃO DE PERIGO ATRAVÉS DOS DIAGRAMAS ÚNICOS E CONTÍNUOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profª. Drª. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte.

Recife

2019

Catalogação na fonte
Bibliotecário Gabriel da Luz, CRB-4 / 2222

R484i Ribeiro, Leonardo de Aguiar Duarte.
Identificação de perigo através dos diagramas únicos e contínuos / Leonardo de Aguiar Duarte Ribeiro – Recife, 2019.
74f., figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientadora: Profª. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Identificação do perigo. 3. Diagrama único. 4. Diagrama contínuo. Gerenciamento de risco. 5. Falhas dependentes I. Duarte, Dayse Cavalcanti de Lemos (Orientadora). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.) BCTG/2019 - 255

LEONARDO DE AGUIAR DUARTE RIBEIRO

Estudo de caso – Identificação de perigo através dos diagramas únicos e contínuos

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: _03__/__07___/___2019___.

BANCA EXAMINADORA

_____

Profª. Drª. Dayse Cavalcanti Lemos Duarte (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profº. Dr. José Jéferson do Rego Silva (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profº. Dr. Ivan Vieira de Melo (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais, Romero e Solange, pelo incentivo, apoio e dedicação que foi dado ao meu desenvolvimento, passando segurança e certeza para alcançar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

.

Aos meus pais, Romero e Solange, por sempre acreditar, pelo apoio sem medida e exemplo de vida, que me inspiram todos os dias a não medir esforços para ir além.

À minha irmã, Luísa, por me apoiar nas mais diversas escolhas e sempre estar ao meu lado durante minha vida.

Aos meus avós, maternos e paternos, por sempre estarem presentes na minha formação pessoal.

À minha bivó Lucila por me ensinar a ser uma pessoa livre e correr atrás dos meus ideais.

À professora Dayse por ter me acompanhado e dado suporte durante toda minha trajetória neste trabalho, sendo compreensiva e disponível durante todo o tempo.

Agradeço também a todos os amigos e companheiros de caminhada, Athos Cavalcanti, Lucas Arruda, Francisco de Souza, Eduardo Hirschle, Henrique Schwambach, Heraldo Almeida, Felipe Fernandes, Pedro Barbosa e Antônio Lucas pelos momentos compartilhados durante todos esses anos e pelo aprendizado dentro e fora do ambiente acadêmico.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma metodologia para a realização do primeiro passo de um sistema de gerenciamento de risco, a identificação do perigo. Este primeiro passo é um dos mais importantes, já que é impossível prevenir ou mitigar um risco sem conhecê-lo. As atuais ferramentas utilizadas na análise quantitativa e qualitativa de sistemas (Árvore de Falhas e Árvore de Eventos) assumem a independência entre falhas, o que não favorece a visualização de falhas dependentes. Neste estudo, os diagramas lógicos únicos e contínuos, propostos pelo Fitzgerald, foram utilizados como uma nova ferramenta para a identificação dos perigos, já que permite a visualização da dependência entre as falhas. Para isso, foi desenvolvida uma estruturação para a análise desses sistemas através dos diagramas únicos e contínuos, sendo este passo a passo aplicado neste trabalho na operação de caldeiras no contexto de uma cervejaria. Os resultados mostraram que o uso desses diagramas viabiliza maior organização e integração entre as análises do sistema, assim como proporcionam uma transição coerente entre uma avaliação macro e micro de sistemas.

Palavras-chave: Identificação do perigo. Diagrama único. Diagrama contínuo. Gerenciamento de risco. Falhas dependentes.

ABSTRACT

The present work presents a methodology for the accomplishment of the first step of a risk management system, the identification of the hazard. This first step is one of the most important, since it is impossible to prevent or mitigate a risk without knowing it. The current tools used in the quantitative and qualitative analysis of systems (Fault Tree and Event Tree) assume the independence between failures, which does not favor the visualization of dependent faults. In this study, the unique and continuous logic diagrams, proposed by Fitzgerald, were used as a new tool for the identification of the hazards, since it allows the visualization of the dependency between the failures. For this, a structuring was developed for the analysis of these systems through the single and continuous diagrams, being this step by step applied in this work in boilers in the context of a brewery. The results showed that the use of these diagrams enables greater organization and integration between the analyzes of the system, as well as providing a coherent transition between a macro and micro evaluation of systems.

Keywords: Hazard identification. Single value networks. Continuous value networks. Risk management. Dependent failures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Demonstração do conceito de Falha.....17

Figura 2 – Classificações da Falha.....17

Figura 3 – Camadas de Proteção..... 19

Figura 4 - Modelo de gestão de risco.....22

Figura 5 - Estruturação de uma Árvore de Falhas.....23

Figura 6 – Estruturação de uma Árvore dos Eventos.....25

Figura 7 – Diagrama de Blocos Funcionais.....29

Figura 8 – Metodologia.....30

Figura 9 –Fluxo de processo resumido de uma cervejaria.....31

Figura 10 – Fluxograma do Beneficiamento.....32

Figura 11 - Fluxograma da Brassagem.....33

Figura 12 – Fluxograma da Adegas.....33

Figura 13 –Fluxograma da Filtração.....34

Figura 14–Fluxograma do Packaging.....35

Figura 15 – Caldeira a gás flamotubular.....37

Figura 16 – Tubos aqua e flamotubulares de uma caldeira.....40

Figura 17 – Caldeira a biomassa mista.....40

Figura 18 – Ilustração de uma caldeira mista.....42

Figura 19 – Circuito fechado de geração de vapor.....45

Figura 20 – Fluxograma da Usina de beneficiamento de CO2 47

Figura 21 – Ciclo de refrigeração por compressão em Chillers.....48

Figura 22 – Fluxograma de compressão e distribuição de ar.....48

Figura 23 – Diagrama de blocos fundamentais da cervejaria.....49

Figura 24 – Barreiras de proteção crítica da cervejaria.....50

Figura 25 – AHP geral da área crítica.....52

Figura 26 – Resultado dos pesos dos critérios de definição da área crítica.....53

Figura 27 – Matriz comparação da área crítica.....53

Figura 28 – Resultado matriz normalizada.....54

Figura 29 – AHP geral do equipamento crítico.....55

Figura 30 – Resultado dos pesos dos critérios de definição da área crítica.....55

Figura 31 – Matriz comparação do equipamento crítica.....56

Figura 32 – Resultado matriz normalizada equipamento.....56

Figura 33 – Exemplo de DU avaliando atuação de incêndio estabelecido.....58

Figura 34 – Exemplo de DU avaliando a Confiabilidade do Sistema (CS).....59

Figura 35 – Exemplo de DC com cenários de deteção ou não da falha de alarme...60

Figura 36 – DC exemplo para cálculo de probabilidade.....61

Figura 37 –AF falha na geração de vapor.....63

Figura 38 – AF falha no exaustor.....63

Figura 39 – Diagrama contínuo de geração de vapor para cozinhador de mosto.....65

Figura 40 – Diagrama único exaustor em falha.....66

Figura 41 – Diagrama único de incêndio estabelecido.....68

Figura 42 – Combinação de diagramas únicos e contínuos.....70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Simbologia e aplicação das portas lógicas.....11

Tabela 2 – Valores adotados pela AHP.....11

Tabela 3 – Exemplo de matriz comparação.....11

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE	Árvore de Eventos
AF	Árvore de Falhas
AHP	Análise Hierárquica de Processo
AIChE	*American Institute for Chemical Engineer*
CS	Confiabilidade do Sistema
CCPS	*Center for Chemical Process Safety*
DC	Diagrama Contínuo
DU	Diagrama Único
EO	Eficácia Operacional
FCC	Falha de Causa Comum
ICE	*International Electrotechnical Commission*
OSHA	*Occupational Safety and Health Administration*
SIF	Função Instrumentada de Segurança
SIL	Nível de Integridade de Segurança
SIS	Sistema Instrumentado de Segurança

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 14
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO..... **14**
1.2 OBJETIVOS..... **16**
1.2.1 Objetivo geral..... 16
1.2.2 Objetivo Específico..... 16
2 FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA..... 17
2.1 FALHAS..... 17
2.2 BARREIRAS DE PROTEÇÃO..... 19
2.3 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DO PERIGO..... 22
2.3.1 Árvore de falhas..... 23
2.3.2 Árvore dos eventos..... 26
2.4 MÉTODO SAATY..... 27
2.5 DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAIS..... 30
3 METODOLOGIA..... 31
4 RESULTADOS 32
4.1 ENTENDENDO COMO CERVEJARIA FUNCIONA E OPERA..... 31
4.1.1 Brassagem..... 33
4.1.2 Adegas..... 34
4.1.3 Filtração..... 35
4.1.4 Packaging..... 35
4.1.5 Utilidades 37
4.1.5.1 Sistema de geração de vapor..... 37
4.1.5.1.1 Caldeira a gás natural flamotubular..... 37
4.1.5.1.2 Caldeira de biomassa mista..... 40
4.1.5.2 Usina de CO2..... 47
4.1.5.3 Sistema de refrigeração..... 48
4.1.5.4 Ar comprimido..... 48
4.2 FLUXOGRAMA FUNDAMENTAL DA CERVEJARIA..... 50
4.3 PRINCIPAIS BARREIRAS DE PROTEÇÃO DA CERVEJARIA..... 51
4.4 DEFINIÇÃO CONDIÇÕES DE CONTORNO..... 52
4.4.1 Definição da área crítica..... 53

4.4.2 Definição do equipamento crítico..... 55
4.5 DIAGRAMAS LÓGICOS ÚNICOS E CONTÍNUOS..... 58
4.6 ESTUDO DE CASO..... 63
5 CONCLUSÕES..... 72
REFERÊNCIAS..... 73

1 INTRODUÇÃO

A espinha dorsal para um bom programa de gerenciamento de risco é a identificação do perigo, pois é impossível prevenir e mitigar um perigo que não pode ser identificado, ou ao menos entendido. Diversas técnicas são utilizadas para identificação do perigo, sendo as mais conhecidas a Árvore das Falhas e Árvore dos Eventos. Entretanto, essas técnicas assumem a independência entre galhos, sendo ineficaz para a identificação do perigo em sistemas onde a dependência entre os galhos existe.

Os diagramas propostos pelo Prof. Fitzgerald, conhecidos como diagramas únicos e contínuos, os quais foram concebidos para o gerenciamento dos riscos de incêndio em edificações baseados no desempenho, foram utilizados no presente estudo para identificação dos perigos em caldeiras. Pois estes diagramas permitem a visualização da dependência entre os galhos e como os eventos podem estar conectados.

O diagrama contínuo é análogo a um filme em movimento inicia-se com um evento específico e identifica a sequência de eventos que surgem a partir do evento inicial, pela sua ordem de acontecimentos. Pelo outro lado, o diagramas único é apenas um *pedaço do filme*, ou seja ele nos permite analisar em detalhes o desempenho de cada pedaço que faz parte do diagrama contínuo. Em outras palavras, o diagrama contínuo nos permite representar a sequência de eventos, identificando condicionalidade entre eventos e incorporando o tempo no processo. O diagrama único nos permite *parar o mundo* a qualquer instante para analisar as causas ou condições naquele instante.

1.1 Justificativa Do trabalho

Vários acidentes envolvendo incêndios e explosões ao redor do mundo ocorreram ao longo da história da humanidade. Tais incêndios ocorrem em teatros, em hotéis, em shopping centres, na indústria de processamento, na indústria de

alimentos, etc. Após alguns destes acidentes ocorridos no passado recomendações de projeto, normas e códigos foram surgindo, os quais são baseados em nossas falhas. Como consequências destes acidentes podemos citar elevadas perdas humanas, falência de negócios e preocupação da sociedade. Como solução surgiram as recomendações sobre materiais de construção, dimensões, sistemas de proteção entre outras. Por outro lado, se um novo acidente acontecia este deixava evidente as limitações das recomendações, códigos e normas em vigor. Como resultado, novas recomendações eram adicionadas as já existentes sem uma prévia avaliação. As recomendações prescritivas estão baseadas na experiência e sobretudo em desastres. E essas recomendações não deixam claro quais as suas intenções.

Por outro lado, o paradigma da microeletrônica está muito mais presente nas organizações do que a 20 anos atrás. Novos dispositivos baseados na tecnologia da informação estão sendo aplicados para se obter vantagem competitiva. A vantagem competitiva está se tornando cada vez mais necessária por conta do processo de globalização em que o mercado está passando atualmente. Ou melhor, as recomendações prescritivas estão bem estabelecidas e o seu sucesso é reconhecido, porém questionamentos tornam-se importantes, o que tem nos conduzidos as recomendações baseadas no desempenho. Recomendações baseadas no desempenho implica em avaliações dinâmicas. Sendo urgente o desenvolvimento de ferramentas para a identificação dos perigos que nos permita visualizar a interação dos cenários de falhas.

A identificação dos perigos é uma das pedras fundamentais na implementação de qualquer programa de gerenciamento de riscos, devendo ser realizada durante todo o ciclo de vida do sistema. Pois, o que não pode ser identificado não pode ser avaliado ou prevenido. Os benefícios de uma avaliação de perigos são substanciais, apesar destes efeitos serem de difícil quantificação em um período de tempo curto. Estes benefícios incluem: 1) poucos acidentes durante o ciclo de vida do sistema ou processo; 2) as consequências são menores quando os acidentes acontecem; 3) o tempo de resposta durante uma emergência é menor; 4) melhoria do programa de treinamento e entendimento do processo; 5) maior eficiência na execução de vários procedimentos; 6) melhor atendimento (i.e.,

cumprimento) das boas práticas de engenharia, ou seja, a legislação; e 7) melhor relacionamento com a sociedade.

Os métodos de identificação dos perigos, podem ser divididos em três grupos: a) métodos comparativos, b) métodos fundamentais e c) métodos do diagrama das falhas lógicas. A identificação dos perigos é o objeto do presente estudo. Os diagramas contínuos e únicos, os quais não são recomendados pelo Instituto Americano de Engenheiros Químicos serão utilizados na identificação do risco de explosão de caldeiras que é um dos equipamentos críticos na fabricação de cerveja, por permitir a visualização da interação do mecanismo de falhas e danos entre os cenários que são plausíveis de acontecer.

1.2 OBJETIVOS

Este tópico esclarece o objetivo geral e o objetivo específico do estudo.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do presente estudo é utilizar uma metodologia para a identificação dos perigos que incorpore as vantagens das árvores das falhas e dos eventos em um único diagrama lógico chamado de diagramas contínuos e únicos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste projeto consistem em uma série de etapas necessárias para obtenção de conhecimento e maturidade acerca do tema abordado, de modo a dar embasamento para que o objetivo do estudo de caso seja alcançado.

- Estudar o conceito de Falha e Barreiras de Proteção: será avaliada a definição desses elementos, permitindo o entendimento do processo de fabricação da cerveja.
- Analisar o processo de fabricação de cerveja (objeto de estudo) utilizando o fluxograma funcional.
- Delinear as condições de contorno do objeto de estudo através da ferramenta de decisão multicritério da Análise Hierárquica de Processos (AHP).

- Estruturação dos diagramas únicos e contínuos.
- Aplicação dos diagramas únicos e contínuos no equipamento crítico da área crítica da cervejaria.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento deste estudo, é necessária primeiramente uma análise teórica do tema em estudo. Assim, será possível esclarecer os detalhes do problema que será tratado.

Neste capítulo são detalhados alguns conceitos e definições imprescindíveis para o entendimento dos diagramas únicos e contínuos. Primeiro, será esclarecido o conceito de Falhas, sua classificação e a definição de Barreiras de Proteção. Em seguida, serão observados os dois principais diagramas lógicos utilizados atualmente na análise de risco.

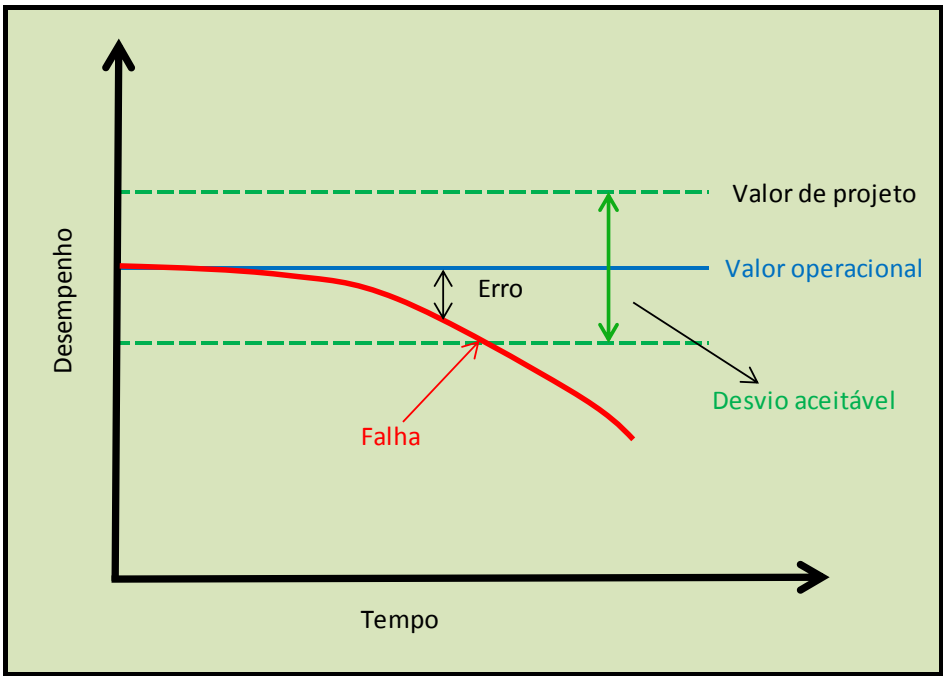
2.1 FALHAS

De acordo com o IEC 50 (1990), International Electrotechnical Commission, a falha é o evento onde a função requerida é interrompida, excedendo os limites aceitáveis de operação, levando assim a uma indisponibilidade operacional do mesmo. Como pode ser visto na Figura 1 abaixo, os sistemas e equipamentos são projetados para atuarem dentro de uma determinada faixa de tolerância. A partir daí, o erro ocorre quando o sistema ou equipamento opera com um valor diferente do valor operacional, porém permanece dentro da faixa de tolerância. Já a falha é caracterizada quando o desempenho do sistema ou equipamento passa a operar fora da tolerância permitida estabelecida durante o projeto.

As falhas são classificadas de acordo com a relação entre elas, conforme ilustrado no diagrama abaixo (Figura 2). Quando os componentes de um sistema falham independentemente um dos outros, essa falha é definida como “independente”. Entretanto, quando há uma conexão entre as falhas, as mesmas são ditas “dependentes”. Segundo Hoyland & Rausand (2004), as dependências

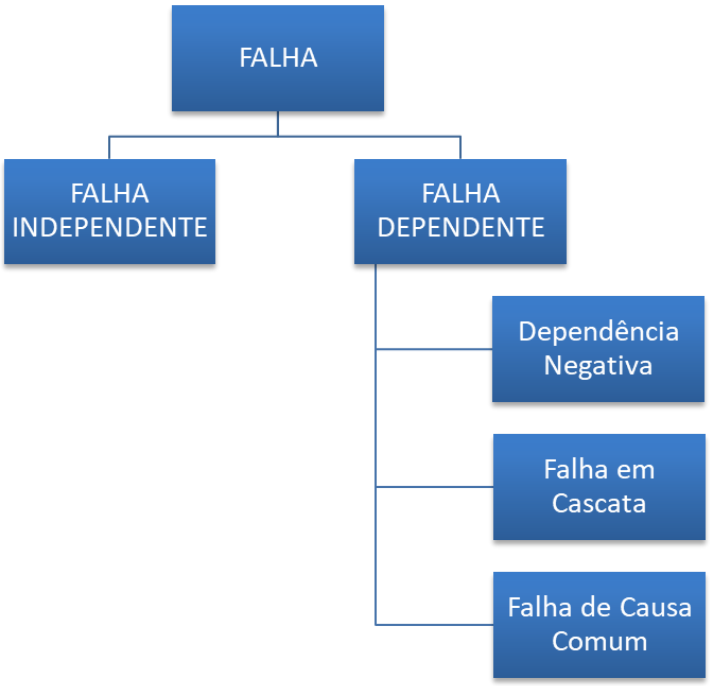
ainda podem ser classificadas em negativas e positivas (falha em cascata e falha de causa comum).

Figura 1 - Demonstração do conceito de Falha



Fonte: Adaptado de Rausand & Oien (1996)

Figura 2 - Tipos de Falha



Fonte: Autor (2018)

- Dependência negativa: esse tipo de ocorrência é caracterizada pela diminuição da probabilidade de falha ou componente dado que um único outro componente falhou.
- Falha em cascata: essas falhas são caracterizadas por um “efeito dominó”, ou seja, a falha inicial de um componente do sistema desencadeia múltiplas falhas de outros componentes em sequência. Em geral isso se deve à sobrecarga que a primeira falha implica em outros componentes.
- Falha de causa comum (FCC): refere-se à falha de dois ou mais componentes ao mesmo tempo e como resultado de uma mesma causa raiz. Este tipo de falha pode comprometer a operação de sistemas redundante

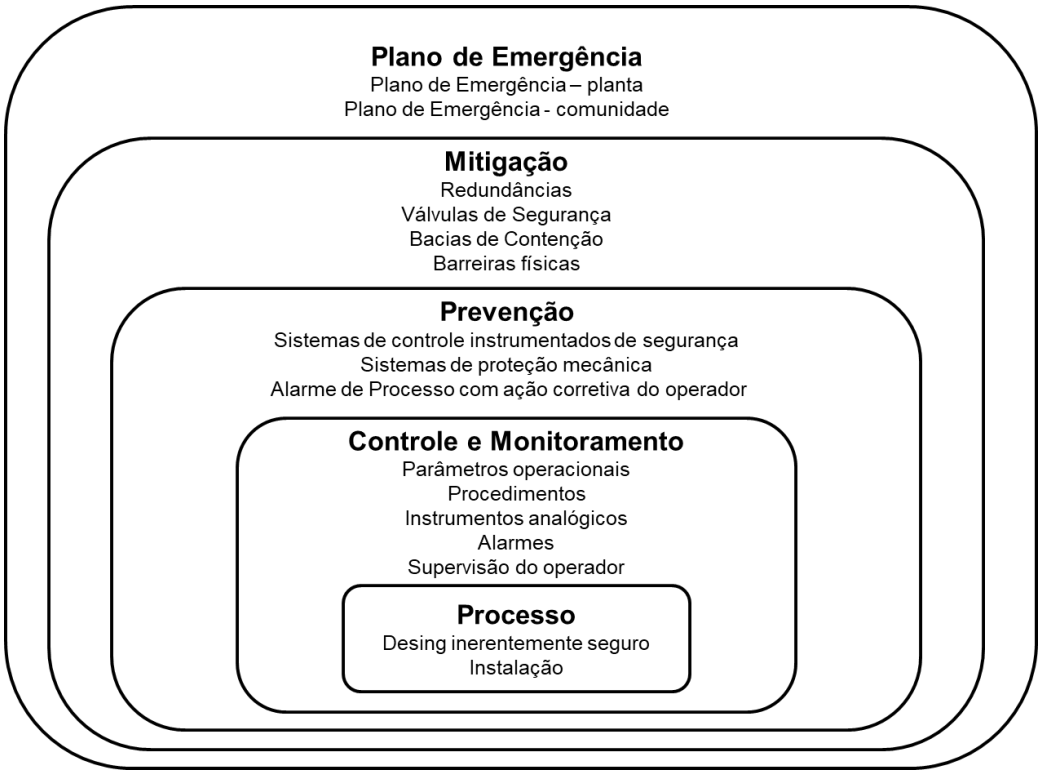
2.2 BARREIRAS DE PROTEÇÃO

No gerenciamento de risco, são utilizadas barreiras ou camadas de proteção nos sistemas para diminuir a probabilidade de acidentes e barreiras de mitigação para atuar na redução das consequências (caso as primeiras barreiras falhem em sua função de proteção). Segundo Freitas e Gomez (1997), o conceito de risco está associado ao potencial de perdas e danos. Logo, considerando a definição de risco dada pela equação abaixo, temos que essas barreiras atuam na prevenção de desastres, reduzindo assim os riscos.

$$\textit{Risco} = \textit{Frequência de ocorrência da falha} * \textit{Severidade da falha}$$

A prevenção pode ser obtida pelo uso de camadas de proteção apoiadas por um sistema de gerenciamento que dificultam a propagação de eventos perigosos e reduzem o risco do processo para níveis aceitáveis. Segundo Gruhn & Cheddie (2006), aumentar o número de camadas de proteção reduz a probabilidade de acidentes. A International Eletrotechnical Commission (IEC) descreve as camadas de proteção como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Camadas de Proteção



Fonte: Adaptado de IEC 61511-3 (INTERNATIONAL..., 2003)

Com o objetivo de atuar na redução ou eliminação dos riscos, a primeira camada de proteção seria o próprio “processo” numa configuração ideal, ou seja, um processo inerentemente seguro. Quão mais cedo no projeto for dada atenção a esse ponto, mais efetiva deve ser a segurança oferecida por ele. Além disso, implica em menos custos, visto que à medida que o design e instalação procedem, mudanças de equipamento, por exemplo, podem ser necessárias. Ou seja, é mais caro corrigir depois que o tempo e dinheiro já foram investidos em um projeto incorreto.

Em seguida, quando o projeto não é suficiente para impedir a falha, as camadas de proteção de “controle e monitoramento” devem agir para diminuir a probabilidade de eventos perigosos. A camada de “controle” é formada por itens, como instrumentos analógicos, e procedimentos para garantir a condição do equipamento dentro dos parâmetros operacionais em que foi projetado. Um exemplo seria um sensor de temperatura que interrompesse a combustão de um processo no qual a temperatura do equipamento ultrapassasse seu limite aceitável. Por outro lado, a camada de “monitoramento” é composta por alarmes críticos e intervenção

humana, de modo a informar e alertar sobre desvios no processo para que ações sejam tomadas quanto a eles.

Já a camada “prevenção” pode ser representada por Sistemas Instrumentados de Segurança (SIS), Funções Instrumentadas de Segurança (SIF), Nível de Integridade de Segurança (SIL) e Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD). Esses atuam na manutenção da segurança em função da resposta a comportamentos indesejáveis do processo.

Quando a falha realmente ocorre, a camada de “mitigação” tem a função de controlar ou reduzir sua severidade. Como exemplo, válvulas de segurança, redundâncias, chuveiros de combate a incêndio, diques, galerias e bacias de contenção fazem parte da camada de “mitigação” e objetivam reduzir a consequência do problema.

Agora, quando a falha se torna um acidente perigoso, a camada de “plano de emergência” tem a função de impedir que a consequência do acidente seja crítica. Essa camada pode ser dividida em duas. A primeira diz respeito sobre o plano de evacuação da população interna à instalação, ou seja, um plano de emergência – planta. Já a segunda, para acidentes de maiores proporções em indústrias próximas à comunidades, diz respeito ao plano de evacuação da população externa à instalação, ou seja, um plano de emergência – comunidade.

Segundo A.M. Dowell III (2011), como exigência do *Center for Chemical Process Safety* (CCPS), as barreiras individuais de proteção devem ser caracterizadas por independência, funcionalidade, integridade, confiabilidade, auditabilidade, acesso seguro e gerenciamento de mudanças.

- Independência: é essencial para evitar que uma camada de proteção seja afetada pela falha de outra camada, pois isso reduziria a eficiência e capacidade delas de conter um acidente.
- Funcionalidade: indica a atuação da barreira de proteção como desejado, ou seja, sua capacidade de detectar a ocorrência da falha e responder a ela, de modo a prevenir o problema.
- Integridade: pode ser quantificada como a probabilidade de falha de determinada camada de segurança.

- Confiabilidade: representa a probabilidade de correta atuação da camada por um certo período de tempo.
- Auditabilidade: como o próprio nome indica, representa a capacidade da barreira de proteção de sofrer auditorias (inspeções, testes) de modo que falhas na mesma possam ser identificadas.
- Acesso seguro: seria a habilidade de a camada ser controlada ao ponto de inibir mudanças não autorizadas na mesma.
- Gerenciamento de mudanças: essa característica é de suma importância não apenas para as camadas de proteção, mas também para sistemas em geral. A menos que a mudança seja, por exemplo, a simples substituição de um equipamento por outro igual, todas as alterações em processos precisam ser avaliadas e revisadas, pois podem acarretar em impactos no sistema em geral.

2.3 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE PERIGO

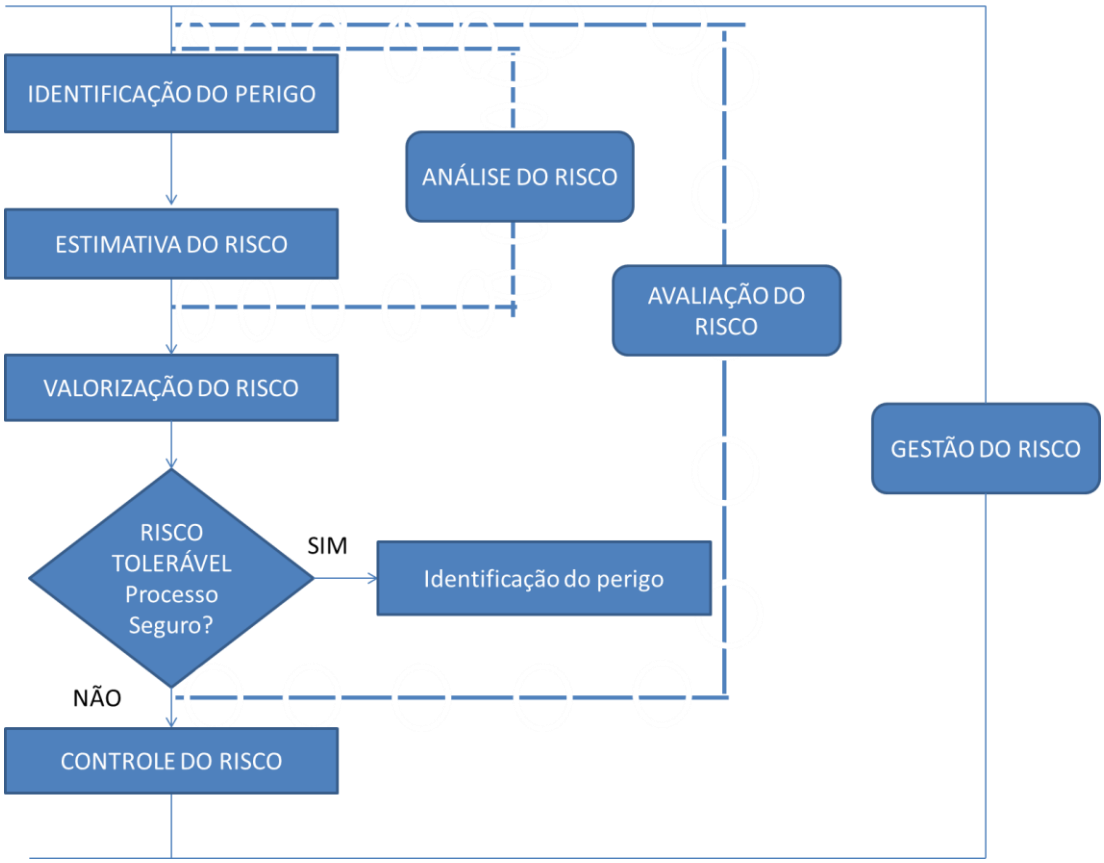
A espinha dorsal para um bom programa de gerenciamento de risco é a identificação do perigo, pois é impossível mitigar um perigo que não pode ser identificado, ou ao menos entendido. Segundo a norma regulamentadora NR-10, perigo é a situação ou condição de risco com probabilidade de causar lesão física ou dano à saúde das pessoas por ausência de medidas de controle.

A metodologia para o gerenciamento dos riscos, Figura 4 foi estruturada para identificar as fontes de perigos interna e externa a organização. E está baseada nos seguintes questionamentos:

- *O que pode dar errado?*
- *Como pode dar errado?* Como a organização e suas barreiras de proteção (i.e. sistemas de proteção) irão reagir a eventos indesejáveis, ou seja, desvios do sistema e subsistemas.
- *Quais as consequências desses desvios?*

A seguir, serão comentadas duas técnicas, Árvore das Falhas e Árvore dos Eventos, usadas para a identificação de perigos recomendadas pelo *American Institute for Chemical Engineer* (AIChE).

Figura 4 - Modelo de gestão de risco

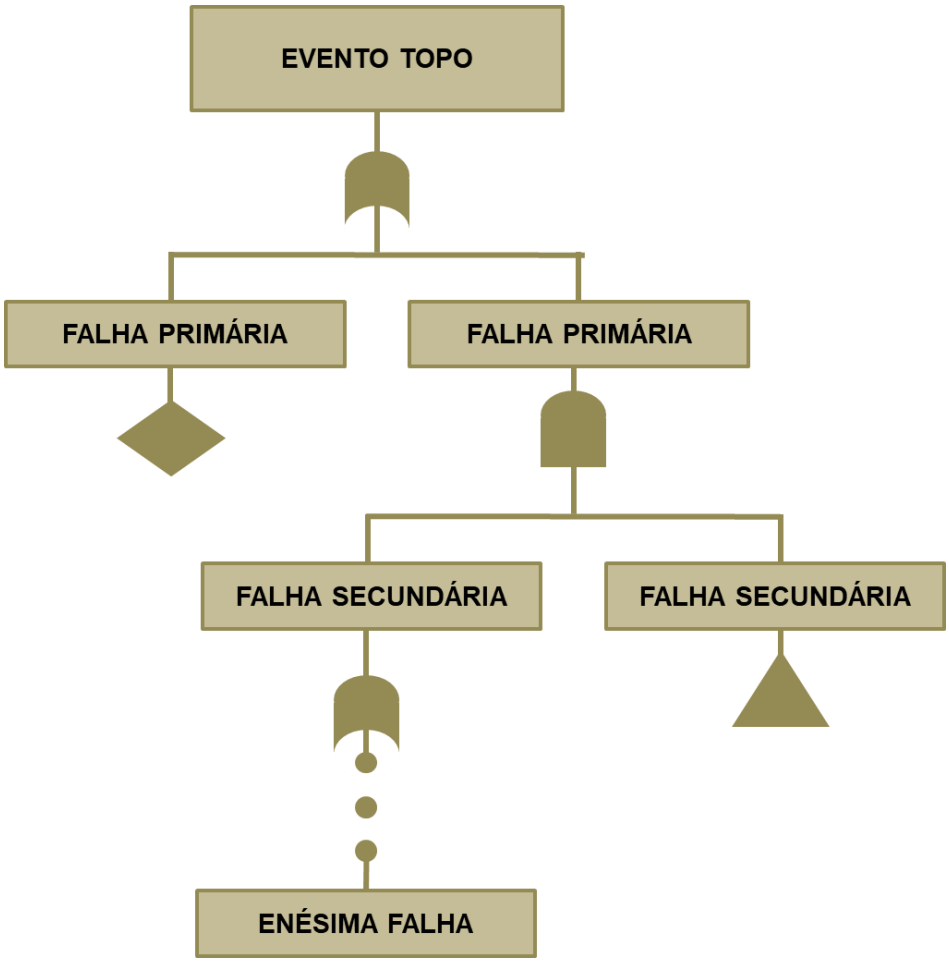


Fonte: Autor (2018)

2.3.1 Árvore das falhas

Segundo Hammarberg e Nadjm-Tehrani (2003), a Árvore de Falhas é um modelo gráfico que parte de um modo de falha denominado “evento de topo”, buscando as causas diretas da ocorrência do evento.

Figura 5 - Estruturação de uma Árvore de Falhas



Fonte: O autor (2018)

Sendo um dos modelos lógicos mais aplicados na identificação de perigos, as árvores de falhas permitem tanto uma análise quantitativa (cálculo da probabilidade de acontecer determinados cenários), como também qualitativa (visualização e entendimento dos cenários de falha). Assim, basicamente essa técnica é desenvolvida através da elaboração de um diagrama que parte de um evento topo ou falha do sistema e o mesmo é dividido em falhas primárias que podem levar a ele, falhas secundárias que podem levar as falhas primárias e assim sucessivamente (Figura 5). Dentro de um sistema pode haver uma enorme quantidade de modos de falha, tornando extremamente complexo e grande a construção de diagramas lógicos. Assim, a avaliação até a enésima falha fica a critério de quem está elaborando a árvore de falhas e de qual nível de detalhe se queira atingir. Além

disso, esse é um processo dedutivo que depende muito da experiência de quem está elaborando o diagrama, já que a sensibilidade para a identificação das falhas é imprescindível, (LEES, 2004).

Como pode ser observado na Figura 5, os ramos da árvore que descrevem os caminhos da falha são construídos através de portas lógicas. Por este motivo, para o entendimento desta ferramenta, a Tabela 1 apresenta algumas das principais portas e seus significados.

Tabela 1 – Simbologia e aplicação das portas lógicas

SÍMBOLOGIA	APLICAÇÃO
 Evento primário ou básico	Utilizado para eventos básicos que não necessitam de desenvolvimento.
 Evento intermediário	Evento que é resultado da interação de um número de outros eventos básicos ou intermediários.
 Evento não desenvolvido	Evento que não é desenvolvido por falta de informação ou interesse em explorá-lo.
 Porta lógica “OU”	O evento de saída ocorre quando qualquer um dos eventos de entrada ocorre.
 Porta lógica “E”	O evento de saída só ocorre quando todos os eventos de entrada ocorrem.
 Porta de transferência	Usada para indicar que a árvore será mais desenvolvida em outro espaço. Conecta parte separadas de uma mesma árvore.

Fonte: Adaptado de Lees (2004, p. 9/13 – 9/14)

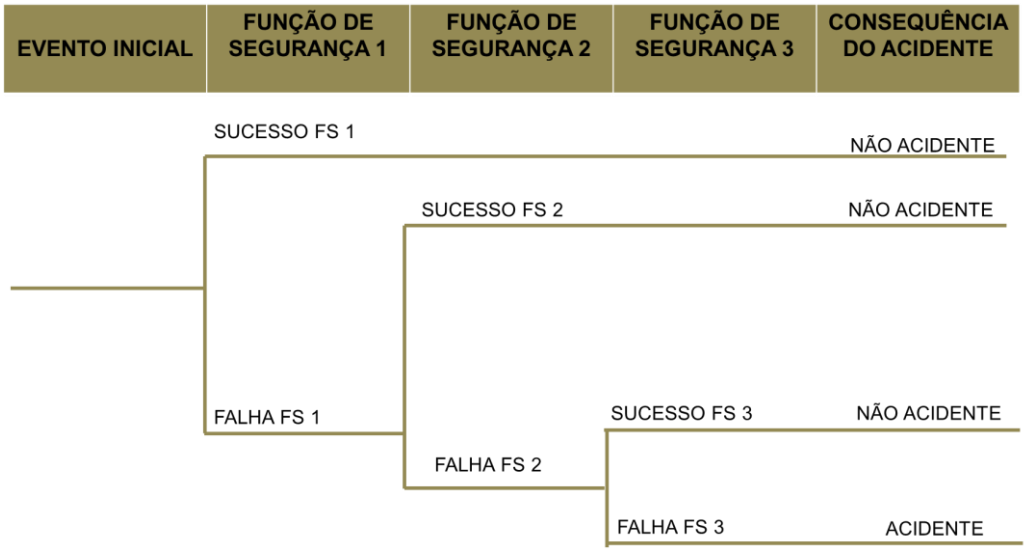
Segundo Dillhon (1978), análise da confiabilidade clássica assume uma independência entre as falhas. Entretanto, as falhas num sistema muitas vezes são dependentes uma das outras, como as falhas de causa comum ou falhas em

cascata. Assim, surge uma limitação da aplicação de árvores de falha, pois seus galhos independentes não detalham nem ilustram a dependência entre componentes.

2.3.2 Árvore dos eventos

A Árvore de Eventos (AE) consiste em um método gráfico, assim como a Árvore de Falhas, para análise tanto qualitativa como quantitativa da confiabilidade de sistemas. Segundo Alberton (1996), na Árvore de Eventos desenvolve-se um esboço da estrutura da análise de eventos com cenários de perigo, sendo bastante semelhante à Árvore de Falhas, mas enquanto esta última apresenta uma árvore lógica orientada verticalmente, a AE é orientada horizontalmente. Outra diferença da AE em relação à AF é que na AE, durante a diagramação, são utilizadas as possibilidades de amortecer o evento inicial. Nesta técnica também pode ser calculada a probabilidade de ocorrência de determinado evento. Vale ressaltar que muitas vezes a Árvore de Falhas e Eventos são usadas como complemento à outra.

Figura 6 - Demonstração da estrutura de AE



Fonte: Autor (2019)

As Árvores de Eventos são estruturadas partindo-se de um evento inicial, normalmente exibido à esquerda (Figura 6). Então é considerada a atuação de cada barreira de proteção existente no sistema com o intuito de controlar o resultado do

evento inicial. Assim, considerando a ocorrência desse evento, é avaliado o sucesso ou falha de cada barreira de segurança, até se chegar à ocorrência ou não de um acidente grave. Através desse procedimento são visíveis os diferentes cenários dos possíveis progressos do acidente inicial, incluindo como cada falha pode afetar o desenvolvimento dele.

Essa ferramenta pode ser utilizada para avaliações do tipo pré-acidente ou pós-acidente. Sendo o primeiro destinada a verificar o quão efetivo é o sistema de operação da planta, o que contribui para identificação da necessidade de implementar melhorias que tornem o sistema mais robusto. Já a segunda é destinada a analisar as possíveis consequências decorrentes do erro inicial (CCPS, 2010).

Um ponto fraco da identificação de perigo através da Árvore de Eventos é a impossibilidade de decompor eventos em fatores que contribuam para eles e estabelecer uma hierarquia entre esses fatores, o que, como mencionado anteriormente, termina sendo complementado pelo uso de AF's. Além disso, assim como ocorre com as AF's, as AE's assumem independência entre eventos. De modo que as falhas dependentes não são bem comunicadas.

2.4 MÉTODO SAATY DA ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS

A área e o equipamento crítico serão identificados através da Análise Hierárquica de Processos (AHP). A AHP é uma ferramenta multicritério de decisão desenvolvida por Saaty (2001) destinada à resolução de problemas complexos onde aspectos qualitativos e quantitativos devem ser considerados. Tem como objetivo organizar os critérios de um problema em uma estrutura hierárquica. Além disso, ao transformar decisões complexas em simples comparações, a AHP auxilia não apenas na melhor decisão, mas também simplifica o entendimento da tomada de decisão.

A metodologia utilizada nessa ferramenta é de realizar comparações aos pares entre os critérios a serem avaliados em um sistema. Assim, um número é atribuído à relação existente entre dois critérios. Quanto maior esse número, mais relevante um critério é em relação ao outro para o sistema. Assim, a AHP desenvolve a solução para um problema complexo através da divisão em outros

menores e mais simples. As relações existentes entre os critérios podem ser dadas como ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores adotados pela AHP

Valor Adotado	Definição	Explicação
1	Equivalentes em Importância	Atributos Comparados são Equivalentes em Relação ao Critério Analisado
3	Pequena Superioridade na Importância	Um dos Atributos Comparados é um Pouco Mais Importante em Relação ao Critério Analisado
5	Moderada Superioridade na Importância	Um dos Atributos Comparados é Moderadamente Mais Importante em Relação ao Critério Analisado
7	Grande Superioridade na Importância	Um dos Atributos Comparados é Muito Mais Importante em Relação ao Critério Analisado
9	Superioridade Absoluta	Um dos Atributos Comparados é Incontestavelmente Mais Importante em Relação ao Critério Analisado
2, 4, 6 e 8	Valores Intermediários entre as Definições Anteriores	Quando a Comparação entre os Atributos não se Encaixa Exatamente nas Explicações Anteriores
Decimais	Resultantes de Comparação Inversa entre os Valores Anteriores	Quando a Comparação entre os Atributos Possui o Mais Importante no Denominador

Fonte: Autor (2019)

Os resultados das comparações podem ser alocados em uma matriz de forma a melhor organizá-los. Como pode-se ver na matriz de comparação da Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplo de matriz comparação

Critério Comparativo	A	B	C	D
A	1	5	6	7
B	1/5	1	4	6
C	1/6	1/4	1	4
D	1/7	1/6	1/4	1

Fonte: Autor (2019)

Ao analisar a matriz de comparação da Tabela 3, pode-se tomar as seguintes conclusões:

- A diagonal da matriz sempre apresenta valor igual a 1 já que a comparação está sendo feita entre um critério e ele mesmo. Ou seja, possuem mesmo peso;
- O elemento (1,2) demonstra que o critério A quando comparado com o critério B possui, como mencionado no quadro 1, *Moderada Superioridade na Importância* para o sistema. E, como era de se esperar, o elemento (2,1) da matriz possui valor 1/5. Pode-se assumir a mesma lógica para o preenchimento do restante dos elementos da matriz.

Um ponto a ser notado nas matrizes é a consistência da matriz. A consistência da matriz diz o quanto os valores alocados aos elementos da matriz fazem sentido. Dessa maneira, se A é 5 vezes mais relevante que B e 6 vezes mais relevante que C, o critério B deveria ser 6/5 vezes mais relevante que o elemento C. O que não se mostra verdade na matriz tomada como exemplo, o que a tornaria uma matriz inconsistente. Por se tratar de um método que possui aspectos qualitativos na tomada de decisão, Saaty tomou como limite de inconsistência o valor de 0,1. Esse limite, representado pelo índice de consistência (IC) de uma matriz, pode ser obtido através dá fórmula abaixo:

$$IC = Índice\ de\ Consistência = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1}$$

Onde:

- $\lambda máx$ = Autovalor de maior valor da matriz analisada;
- n = Ordem da matriz.

Além do IC, Saaty também recomenda o cálculo da Razão de Consistência (RC) da matriz. Esse índice é obtido através da fórmula abaixo:

$$RC = Razão\ de\ Consistência = \frac{IC}{Índice\ Randômico\ (IR) para\ n}$$

Após o estabelecimento da consistência da matriz, os critérios são hierarquizados entre si através de uma normalização das médias obtidas nas comparações realizadas. Essa normalização define o peso que cada critério terá na hierarquização do problema

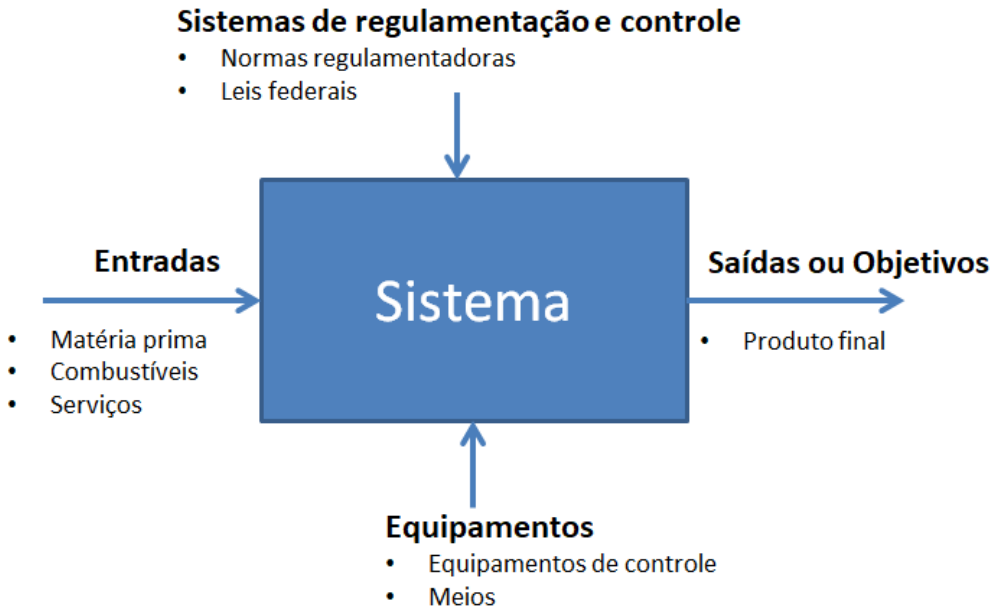
2.5 DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAIS

Os diagramas de blocos funcionais (DBF) são diagramas que permitem visualizar como algum sistema funciona através de uma representação gráfica do mesmo, segundo Bolton (2011).

O DFB é representado por um bloco retangular onde em cada lado do bloco é descrito uma função específica como pode ser visto na Figura 7. No lado esquerdo, temos as entradas – matérias primas, combustíveis e serviços. No topo do bloco, temos os sistemas de regulamentação e controle que regem o funcionamento do sistema ou área. Em baixo do bloco é representado os equipamentos e meios que são utilizados para atingir o objetivo do sistema. Por fim, no lado direito estão as saídas, ou seja, os produtos finais e os objetivos do sistema.

Os diagramas podem ser utilizados separadamente para ter uma visão individual de uma área ou sistema, ou então, podem ser interligados em outros blocos para representar como as áreas e sistemas estão conectados entre si. Isso facilita o entendimento e a análise de sistemas complexos e permite uma clara visualização de seu funcionamento.

Figura 7 – Diagrama de Blocos Funcionais



Fonte: Autor (2019)

3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo de caso se propõe a organizar o pensamento, de modo que se permita atingir os objetivos específicos descritos anteriormente na seção 1.2.2.

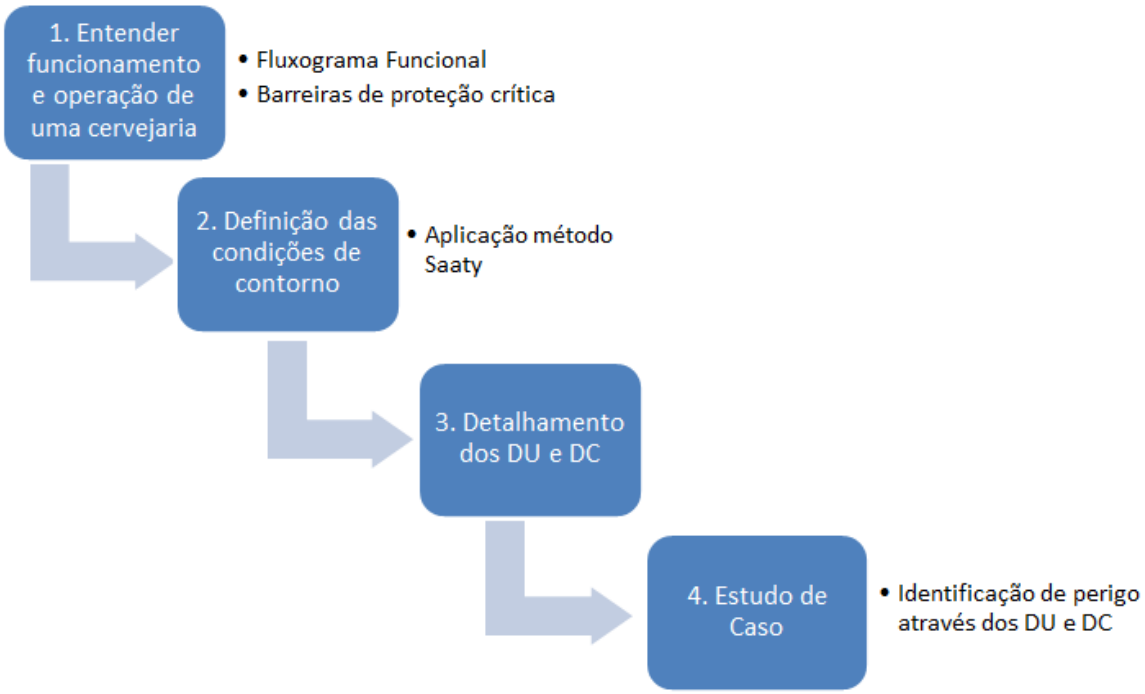
Sendo assim, primeiro vamos entender como o processo de fabricação de cerveja funciona e opera. Para isto, será utilizado o fluxograma funcional e descrito as principais barreiras de proteção da cervejaria para entender todo o processo.

Em seguida, serão delineadas as condições de contorno da cervejaria utilizando o AHP de Saaty para definir qual a área e o equipamento mais crítico do objeto de estudo.

Será detalhado também como os digramas únicos e contínuos, propostos por Fitzgerald, funcionam.

Por fim, o caso de estudo, será aplicado os diagramas únicos e contínuos no equipamento crítico da área crítica, definida através do AHP, a fim de identificar os perigos envolvidos em sua operação.

Figura 8 – Metodologia



Fonte: Autor (2019)

4 RESULTADOS

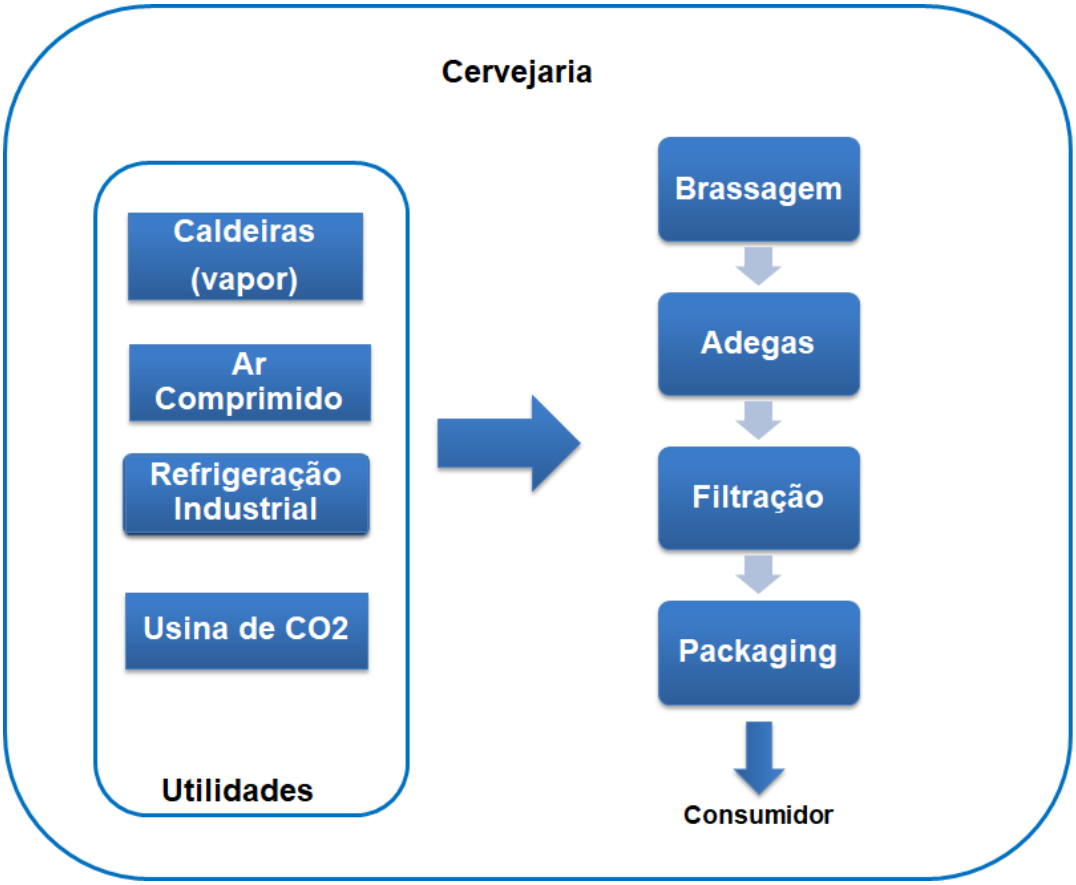
Nesta seção, serão descritos os resultados do presente estudo.

4.1 ENTENDENDO COMO A CERVEJARIA FUNCIONA E OPERA

Nos próximos parágrafos, é descrito o processo de produção de uma cervejaria e as principais etapas que a compõe. Além disso, será discutido como as barreiras de proteção atuam em cada área, a fim de evitar desastres ou acidentes que comprometam a missão da cervejaria.

Sendo a cervejaria nosso sistema (Figura 9), veremos a seguir como funcionam e operam as áreas que a compõe.

Figura 9 – Fluxo de processo resumido de uma cervejaria

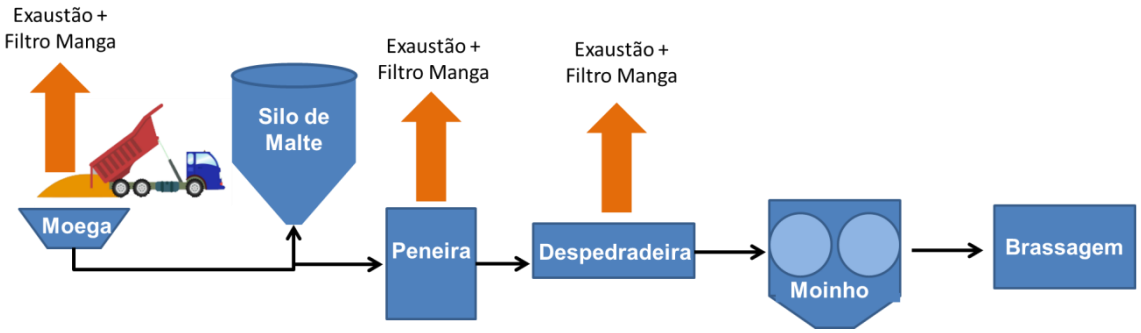


Fonte: Autor (2019)

4.1.1 Brassagem

A brassagem é dividida em beneficiamento e brassagem. No beneficiamento (Figura 10) onde o malte é recebido e passa por uma série de análises e processos físicos de limpeza como, por exemplo, peneira, despedradeira, eletroímãs e filtros mangas. Este é o processo que garante a limpeza do malte que é produzido nas maltarias argentinas ou uruguaias e chegam através de navios no Porto do Recife onde são descarregados em caminhões que o trazem até a cervejaria.

Figura 10 – Fluxograma do Beneficiamento

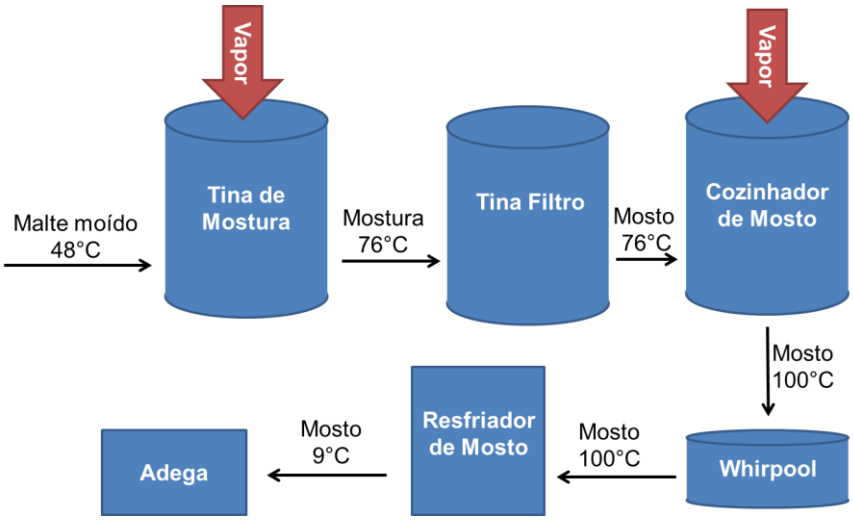


Fonte: Autor (2019)

Já a brassagem propriamente dita é conhecida como a área quente do processo produtivo cervejeiro já que é a maior consumidora de vapor da cervejaria, representando aproximadamente 40% de todo vapor consumido. O processo da brassagem tem duração de aproximadamente 7h e seu fluxo é descrito como podemos ver na Figura 11.

Esta etapa é responsável pela criação do mosto cervejeiro que será fermentado e transformado em cerveja na Adegas como veremos a seguir.

Figura 11 – Fluxograma da brassagem

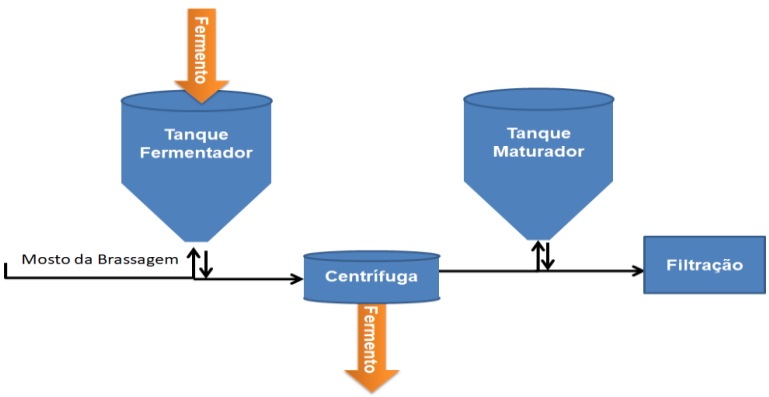


Fonte: Autor (2019)

4.1.2 Adegas

A Adegas (Figura 12) é responsável pela fermentação e maturação da cerveja. Após a aeração do mosto na brassagem, ele é transferido para os tanques fermentadores onde será adicionado fermento. Nesta etapa, a cerveja fermenta por 7 dias até os níveis de diacetil reduzirem de acordo com a receita de cada cerveja. Após fermentada, é necessário retirar o fermento dela antes de entrar no tanque maturador. Para isto, a centrífuga retira todo o fermento contido na cerveja e o reutiliza até 7 vezes em outros tanques. Por fim, a cerveja é maturada para incorporar gosto e seguir para a Filtração.

Figura 12 – Fluxograma da Adegas

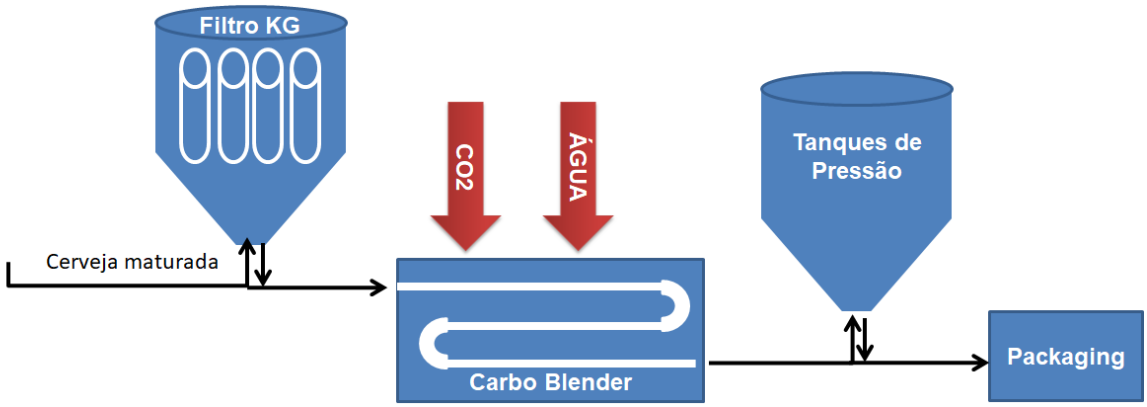


Fonte: Autor (2019)

4.1.3 Filtração

A filtração é a ultima etapa do processo de fabricação da cerveja, é nela onde são filtradas as proteínas e polifenóis responsáveis pela turbidez na cerveja. Além disso, nesta etapa faz-se a blendagem da cerveja, conferindo teor alcóolico, extrato e quantidade de CO2 adequada como pode ser observado na Figura 13. No final da Filtração, a cerveja é enviada para a área de envase chamada de Packaging.

Figura 13 – Fluxograma da Filtração



Fonte: Autor (2019)

4.1.4 Packaging

O packaging é a maior área da cervejaria sendo responsável pelo envase do produto final. Ele é composto por 9 linhas de produção sendo três de refrigerante garrafas PET, uma linha de lata, uma de long neck, uma de chopp e três de garrafas retornáveis de vidro.

Essa é uma área crítica em relação a custo de manutenção e ao fluxo de processo. Por isso a produtividade nesta área é essencial para o sucesso da cervejaria.

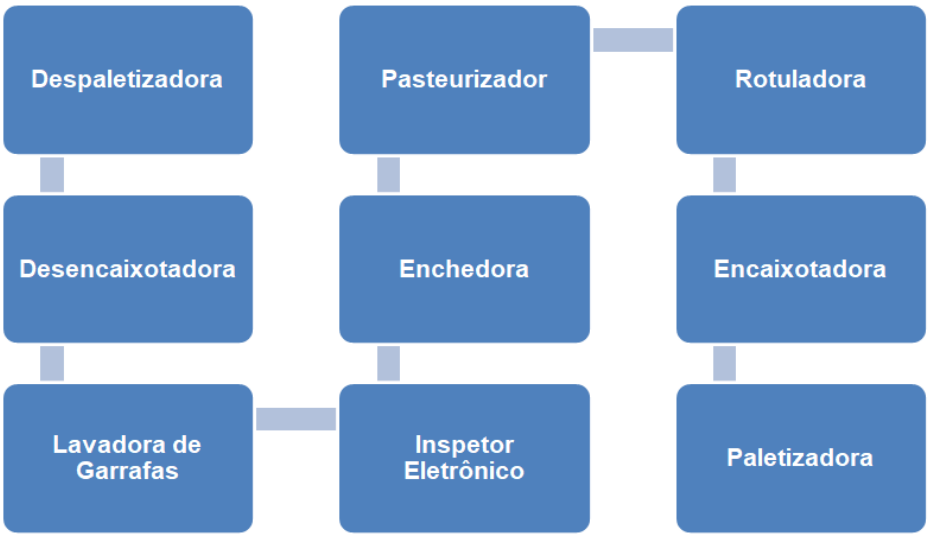
O funcionamento do packaging (Figura 14) começa na despaletizadora onde os pallets com as garrafeiras são separadas. Em seguida segue para a desencaixotadora onde as garrafas são separadas das garrafeiras.

Nas linhas de vidro retornável, as garrafas sujas, vindo do mercado, vão para a lavadora de garrafas que utiliza soda cáustica aquecida e água para lavagem das mesmas. Após lavada, as garrafas passam por um inspetor eletrônico que detecta qualquer anomalia na garrafa como corpo estranho, fissuras, trincas, quebras e sujidade.

Após isto, as garrafas seguem para a enchedora onde será envasada com cerveja que vem da Filtração. Após envasada, as garrafas com cerveja seguem para o pasteurizador, cuja função é pasteurizar a cerveja através do banho térmico com água a diferentes temperaturas para que sua validade seja prolongada no mercado.

Ao fim da pasteurização, as garrafas são rotuladas na Rotuladora e seguem para a encaixotadora onde são agrupadas nas garrafeiras que serão paletizadas na Paletizadora e seguirão para o mercado.

Figura 14 – Fluxograma da Filtração



Fonte: Autor (2019)

4.1.5 Utilidades

A área de Utilidades é uma área de apoio da cervejaria responsável pela geração de vapor, refrigeração industrial, beneficiamento de CO2 e ar comprimido que são utilizados em diversas etapas do processo cervejeiro. Esta é uma área considerada crítica para segurança já que contém substâncias perigosas (CO2 e amônia usada no processo de refrigeração industrial), líquidos e gases a alta pressão com potencial de causa falhas catastróficas e interrupção no fluxo de processo cervejeiro.

4.1.5.1 Sistema de geração de vapor

Na cervejaria, temos dois tipos diferentes de caldeiras operando. O primeiro são caldeiras flamotubulares que utilizam o gás natural como combustível e são bastante comuns em indústrias de processo de bebidas. Já o segundo tipo, são caldeiras de biomassa mistas que utilizam cavaco de cajueiro ou eucalipto como combustível. As caldeiras de biomassa tem uma operação bem mais complexa que a de gás natural e exige o acompanhamento de mais parâmetros operacionais, além de que seu custo inicial de instalação é bastante superior. Entretanto, o custo de operação de uma caldeira de biomassa é bem menor quando comparado as caldeiras à gás. A proporção do preço biomassa e gás natural pode chegar a 1:10, o que justifica a operação da caldeira de biomassa. Além disso, por ser uma fonte renovável de energia, a tendência é que cada vez mais haja a substituição das caldeiras a gás por caldeiras de biomassa.

4.1.5.1.1 Caldeiras a gás natural flamotubulares

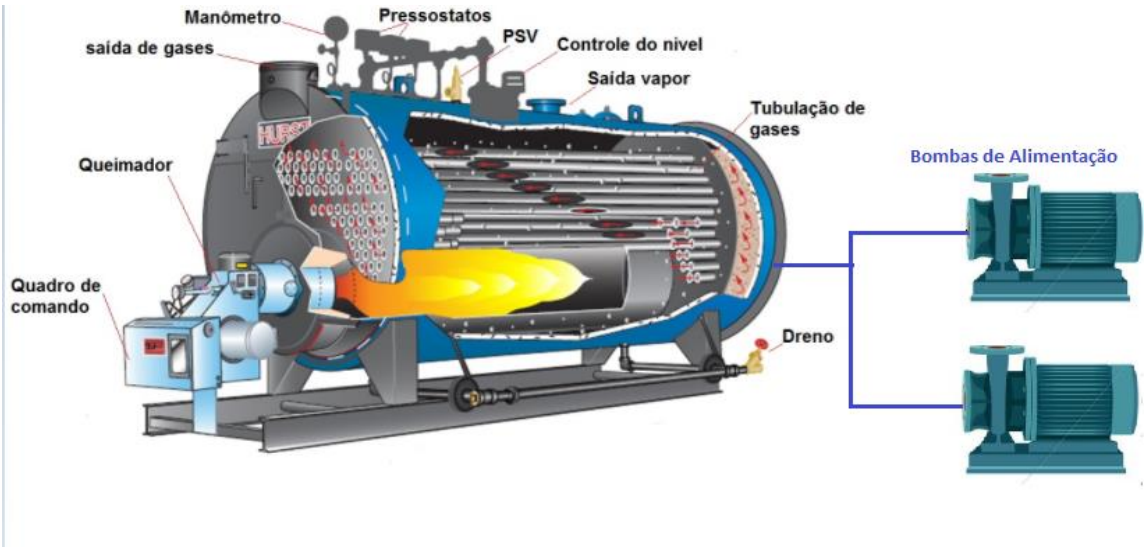
Nas caldeiras flamotubulares, o gás natural é queimado em uma câmara com forma cilíndrica, hermeticamente vedada, denominada fornalha (Figura 15). Os gases quentes circulam dentro do feixe tubular de três passes, transmitindo para suas paredes parte da energia térmica, pelos processos simultâneos de condução e convecção de calor. Tanto a câmara de queima quanto o feixe tubular deverão estar totalmente cobertos externamente por água, a qual absorverá o calor, iniciando o aquecimento e a mudança de estado. As partes que recebem o calor da combustão ou dos gases precisam ser resfriadas, pela própria água a ser vaporizada, ou isoladas termicamente, por meio refratários apropriados. Produzem vapor à uma pressão de 10 kgf/cm2 em uma vazão máxima de 20 ton/h.

A operação de caldeiras à gás natural é extremamente automatizada. Basicamente, o operador de caldeira dá apenas o comando de partida e parada, além de definir a faixa de pressão mínima que a caldeira deve operar. Além disso, existem alguns testes e rotinas operacionais que eles devem cumprir, sendo o mais importante deles o teste de nível de água que veremos com mais detalhe em seguida.

Sobre as barreiras de proteção mais importantes neste tipo de caldeira, destacam-se o controle de nível de água e procedimento de partida. Ambas as barreiras estão altamente relacionadas à prevenção de explosão que é, certamente, o incidente mais grave que pode acontecer numa caldeira a gás.

A premissa inicial para um controle de nível eficiente e seguro é que o nível de água da caldeira seja sempre suficiente para cobrir todos os tubos do feixe tubular de combustão presentes na caldeira. Caso contrário, os tubos expostos, sem contato com a água, podem superaquecer e vir a causar rompimento ou explosão do mesmo. Esta chance aumenta se os tubos expostos entrarem em contato com água fria adicionada a caldeira, pois o choque térmico entre a superfície superaquecida do tubo e a água potencializa a ruptura e explosão dos tubos.

Figura 15 – Caldeira a gás natural flamotubular



Fonte: Adaptado de York (2007)

A leitura do nível de água da caldeira é feita por eletrodos de nível. Quando o eletrodo de nível baixo-baixo é acionado, ele deve emitir um sinal para o CLP da caldeira para que ela realize o “Shutdown”. Ou seja, a entrada de gás natural na caldeira é cortada, as bombas de alimentação de água são desligadas, o queimador é desligado e o ventilador permanece ligado para retirar todo gás natural não queimado de dentro da caldeira. Desta forma garante-se a integridade física da caldeira e a segurança de quem trabalha na área.

Para ter certeza de que a caldeira realizará o shutdown corretamente caso o nível de água atinja o nível baixo-baixo, o operador de caldeira deve realizar, logo no início do turno, o chamado teste de nível da caldeira. Neste teste, ele “engana” os eletrodos de nível ao abrir uma válvula manual embaixo da garrafa de nível onde eles estão localizados. Desta maneira, o CLP entende que o nível está baixo e deve acontecer o shutdown. Neste momento, o operador observa se todos os passos do descritos anteriormente foram realizados. Caso tudo esteja conforme o padrão de shutdown, a caldeira está liberada para operação no turno que foi feito o teste. Caso haja alguma falha no shutdown como, por exemplo, apenas desligar as bombas de água e manter a injeção de gás natural, ou pior, nem sequer realizar o shutdown automaticamente, a caldeira deverá, obrigatoriamente, ser desligada e tirada de operação até que se corrija o problema.

Sobre o procedimento de partida da caldeira, é também um processo totalmente automatizado, a partida acontece somente se todos os seguintes testes forem realizados, nesta ordem, sem haver não conformidades: teste de estanqueidade na tubulação, nível de água suficiente na caldeira, purga dos gases com ventilador ligado, acendimento da pré-chama pelo ignitor, leitura de chama com sensor de chama. Se todos esses passos descritos estiverem em conformidade, então a injeção de gás é liberada e começa-se a combustão e o aquecimento da caldeira. Caso contrário, se qualquer um dos passos descritos estiver não conforme, a caldeira não deve partir e o operador deve acionar mais uma vez o comando de partida para que seja realizado do início todos os testes novamente até que seja sanado o problema.

O maior risco na partida, além do nível baixo de água, é a presença de gás natural dentro da caldeira. Dependendo da quantidade de gás que estiver em seu interior, pode haver uma explosão quando a pré-chama é acesa.

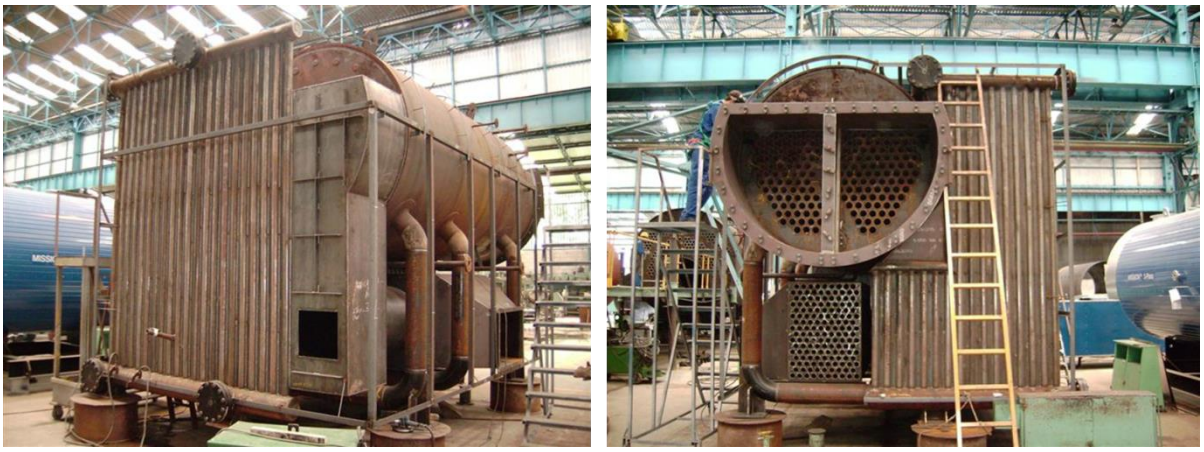
4.1.5.1.2 Caldeiras de biomassa mistas

As caldeiras de biomassa tem um funcionamento muito mais complexo que as caldeiras a gás natural. Além de serem muito maiores fisicamente e possuírem muito mais componentes, ela deve conter um transporte que traz o cavaco do local de armazenamento de biomassa até a entrada da fornalha. Para efeito deste estudo de caso vamos desprezar os riscos envolvidos na operação do transporte, embora discutiremos alguns perigos que se originam na caldeira que podem se extender para o transporte, e focar na identificação dos perigos da caldeira propriamente dita.

A caldeira é dita mista, pois possui uma parte aquatubular, por onde a água passa por dentro dos tubos, e outra flamotubular, por onde os gases quentes de combustão passam por dentro de tubos como podemos observar na Figura 16.

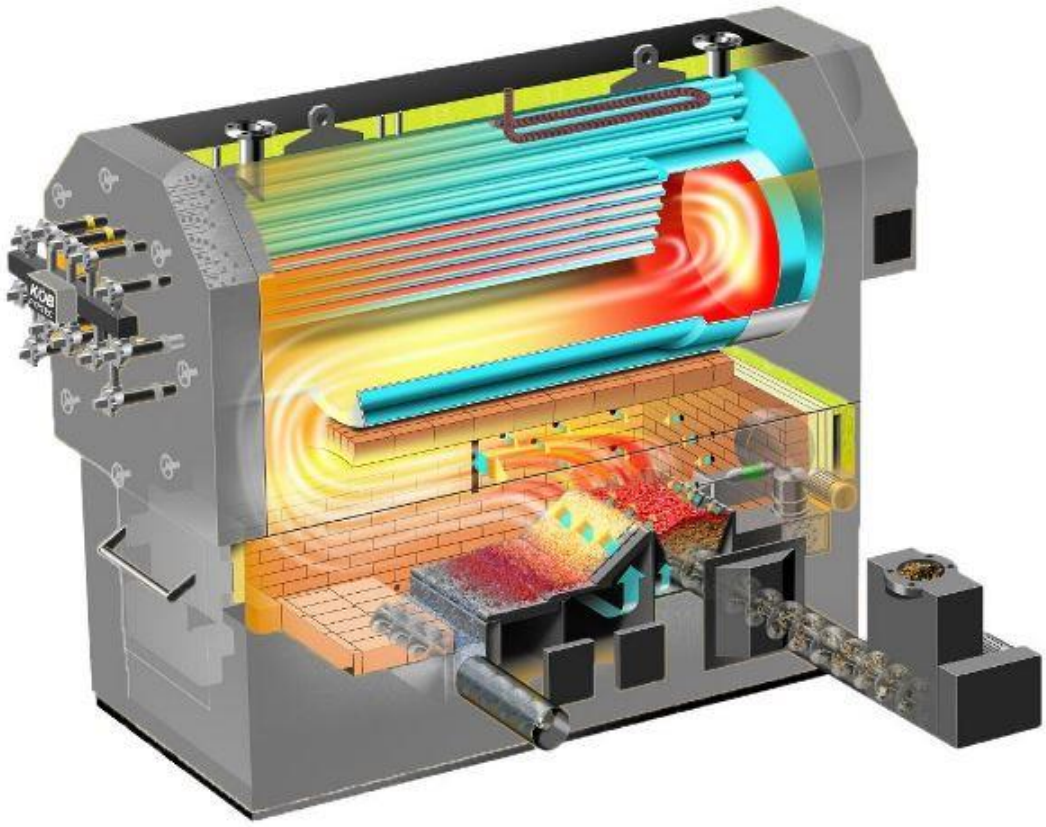
O processo de geração de vapor em uma caldeira de biomassa tem início quando o cavaco é inserido dentro da fornalha através de quatro roscas transportadoras localizadas no silo de cavaco. Logo ao cair na fornalha, o cavaco estará sobre o primeiro dos três grelhados (Figura 17) que se movimentam em períodos de tempo diferentes. O primeiro grelhado é responsável pela secagem da biomassa e início de sua combustão. Já no segundo grelhado é onde acontece a maior parte da combustão do cavaco, consequentemente, é o grelhado com maior área e período de translação. No terceiro e último grelhado, a biomassa deve completar sua combustão e sair da fornalha sobre formas de cinzas. Se encontrarmos biomassa não queimada ou em brasa na saída da fornalha significa que a combustão não está eficiente e estamos desperdiçando energia (calor) para aquecer a água. Assim, deve-se fazer um ajuste no período de avanço e retorno dos grelhados.

Figura 16 – Tubos áqua e flamotubulares de uma caldeira



Fonte: Adaptado de York (2007)

Figura 17 – Caldeira a biomassa mista

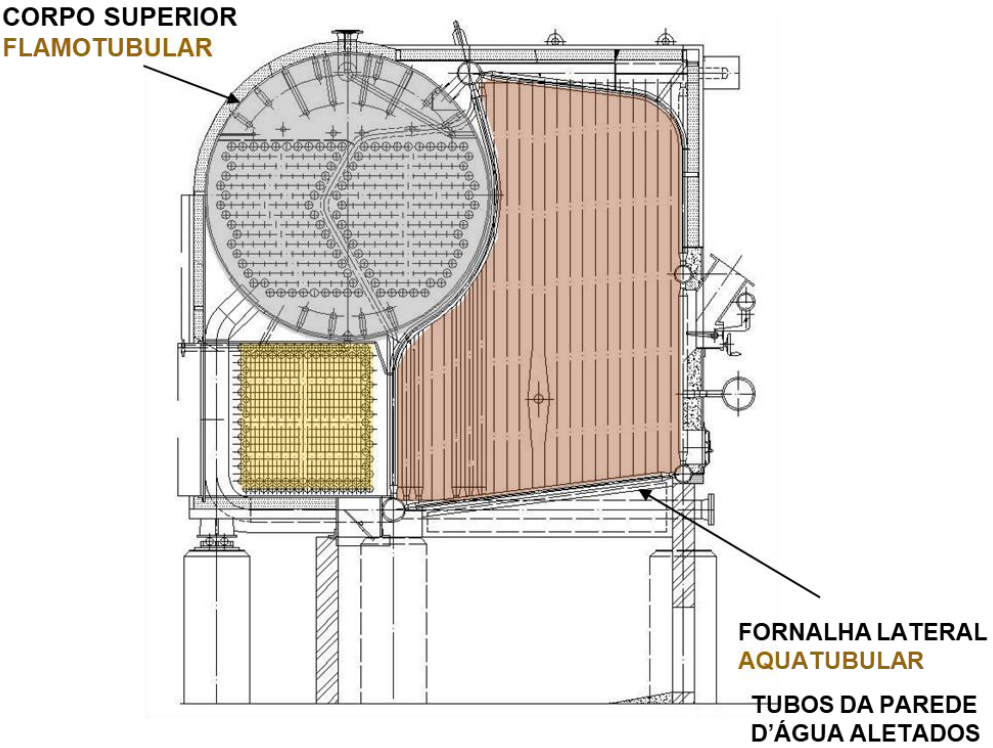


Fonte: Adaptado de York (2007)

A relação ar/combustível é garantida através da modulação do ventilador primário, secundário e as roscas de alimentação. O ar primário entra por orifícios localizados na superfície dos grelhados, enquanto que o ar secundário entra numa altura intermediária da fornalha e tem como função garantir a combustão completa dos gases de combustão, ou seja, transformar os monóxidos de carbono e hidrocarbonetos residuais em dióxido de carbono. A modulação ou PID desses ventiladores usa como entrada o percentual de oxigênio que sai na chaminé da biomassa, através desta leitura o programa entende se está havendo uma combustão eficiente (completa) ou não e ajusta a velocidade dos ventiladores a fim de obter máxima eficiência de combustão.

Os gases de combustão trocam calor primeiramente com a parte aquatubular da caldeira localizada por trás dos refratários internos da fornalha (Figura 18) por onde circula água que é alimentada por duas moto bombas elétricas (existe uma bomba a diesel que só deve ser usada em casos de emergência). Após os gases terem percorrido o interior da fornalha eles passam por uma câmara de conversão e então partem para o interior dos tubos na parte flamotubular da caldeira, onde, neste momento, a água está passando por fora dos tubos e sendo vaporizadas (semelhante à caldeira a gás descrita na seção 3.2.1) a uma pressão máxima de 17 kgf/cm2 em uma vazão máxima de 25 ton/h.

Figura 18 – Ilustração de uma caldeira mista



Fonte: Adaptado de York (2007)

Por fim, os gases de combustão saem da parte flamotubular e vão em direção à chaminé por onde são liberados para a atmosfera. É importante ressaltar que a tiragem dos gases é feita de forma induzida, ou seja, um exaustor localizado embaixo da chaminé succiona todos os gases de combustão presentes na caldeira e libera-os à atmosfera. O funcionamento e modulação desse exaustor é uma das barreiras de proteção crítica da caldeira de biomassa como veremos a seguir.

A operação de caldeiras a biomassa não é tão automatizada quanto às de gás natural. Principalmente no que diz respeito à eficiência energética da mesma, pois há várias regulagens manuais como abertura de dampers, alteração do período de translação dos grelhados, velocidade das roscas transportadoras entre outros parâmetros que devem ser ajustados de acordo com a demanda de consumo de vapor, tipo e umidade do cavaco.

Em relação à segurança, o operador deve estar mais atento aos perigos da biomassa, pois essas caldeiras possuem particularidades que podem comprometer a missão da cervejaria e provocar acidentes mais facilmente do que as de gás natural. Como veremos a seguir, a ação rápida e efetiva do operador sobre as anomalias é de fundamental importância para garantir a operação segura deste tipo de caldeira.

Sobre as barreiras de proteção mais importantes neste tipo de caldeira, destacam-se o controle de nível de água, monitoramento da temperatura das roscas de alimentação, monitoramento da pressão interna da fornalha e procedimento de emergência em caso de falta de energia. Enquanto que na caldeira a gás natural as barreiras de proteção foquem, quase que exclusivamente, na prevenção de explosão, nas caldeiras a biomassa existe um alto risco de provocar incêndios, por isso as principais barreiras de proteção estão relacionadas a esses dois tipos de perigo.

Assim como nas caldeiras a gás, o operador deve realizar no início do turno o teste de nível. Quando o eletrodo de nível baixo-baixo é acionado ele manda uma mensagem para o CLP que deve realizar o shutdown. Na caldeira de biomassa, o shutdown consiste em desligar os ventiladores primários e secundários, parar as roscas de alimentação, para os grelhados, fechar a guilhotina do silo e as duas bombas de alimentação de água. Importante notar que o exaustor nunca deve ser desligado enquanto houver fogo dentro da fornalha, devido ao risco de provocar pressão positiva e retrocesso de chama, como veremos mais a detalhadamente a diante.

A temperatura das roscas de alimentação deve estar sendo sempre monitoradas através de transmissores de temperatura instalados em cada uma das roscas. Caso a temperatura ultrapasse os 50ºC, um sistema de combate a incêndio automático injeta condensado sobre as roscas, evitando assim que haja a combustão da biomassa no silo de alimentação e provoque um incêndio que se estenda por todo o transporte. Além disso, um alarme sonoro é acionado quando a temperatura ultrapassa os 50°C para que o operador verifique se o sistema de combate a incêndio atuou com sucesso. Caso haja erro no acionamento automático, o operador deve abrir uma válvula manual para a injeção de condensado nas roscas. Este é um ponto crítico de atenção na operação deste tipo de caldeira, já

que se o incêndio não for controlado rapidamente no início ele pode se alastrar por várias dezenas de metros chegando a incendiar toda casa de caldeira e comprometer a missão da cervejaria.

O controle da pressão interna da caldeira é outra barreira importantíssima contra risco de incêndio. Neste tipo de caldeira, a pressão interna da fornalha, onde acontece a combustão do cavaco, deve-se manter sempre negativa, ou seja, menor que a pressão atmosférica. Isto é garantido quando a vazão de retirada dos gases de combustão pelo exaustor é maior que a soma das vazões que os ventiladores primários e secundários injetam na fornalha. Caso haja uma pressão positiva, todo fogo da fornalha poderá sair da caldeira, causando um incêndio na área externa ou no silo de biomassa (ponto de saída do fogo preferencial caso haja uma pressão positiva). Assim, o PID dos exaustores e ventiladores deve ser muito bem ajustado para garantir sempre a pressão negativa da fornalha.

Quando ocorre uma falta de energia na operação de caldeiras a gás, não há riscos já que a alimentação a gás é cortada (solenoide de alimentação é normalmente fechada), o ventilador desligado e todos os outros componentes elétricos. Ou seja, assim que há a falta de energia, a combustão é interrompida e a água não consegue trocar calor suficiente para vaporizar e baixar de maneira considerável o nível de água da caldeira. Entretanto, nas caldeiras de biomassa a falta de energia não significa parada de combustão, já que todo o cavaco presente no interior da fornalha continua queimando e consequentemente vaporizando a água presente na caldeira. Água esta que não está mais sendo reposta, já que as bombas de alimentação foram desligadas pela falta de energia. Ou seja, o risco de explosão por nível baixo em situações de falta de energia é alto, assim como o risco de incêndio já que o controle da pressão negativa foi comprometido pelo desligamento do exaustor.

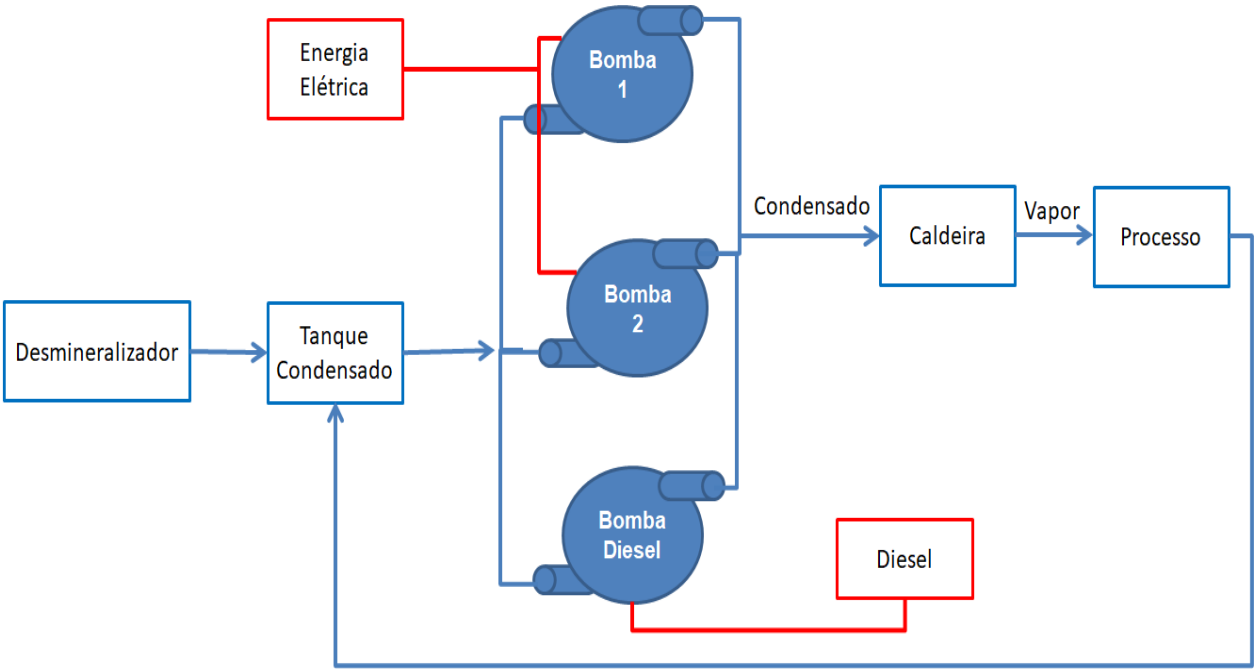
Agora, imaginemos outro tipo de cenário em que a alimentação de água pelas bombas é interrompida, porém não pelo motivo de falta de energia. Este cenário seria ainda pior já que a alimentação de cavaco e a injeção de ar para combustão continuariam operantes, fazendo com que o nível caia ainda mais rápido do que numa situação de falta de energia. Para a alimentação de água ser interrompida ou insuficiente, ambas as bombas devem falhar simultaneamente já que elas são

redundantes, ou seja, apenas uma bomba deve ter vazão e pressão suficiente para alimentar a caldeira, sendo a segunda apenas uma redundância caso haja alguma falha com a primeira. Como vimos na seção 2.1, as Falhas de Causa Comum (FCC) podem comprometer sistemas redundantes como a operação dessas bombas e, consequentemente, provocar graves acidentes.

As duas bombas de alimentação de água em questão na Figura 19 operam em paralelo, sendo assim, logo identificamos que para a operação da caldeira é necessário que pelo menos uma das bombas execute a função para a qual foi designada. A bomba a diesel, como dito anteriormente, deve ser utilizado em casos de emergência como uma falta de energia, por exemplo. Note que todo vapor que é gerado para o processo, volta em forma de condensado para o tanque de condensado tornando esse sistema de geração de vapor um circuito fechado.

Eventualmente, existem perdas no retorno de condensado do processo para o tanque, onde esta perda deve ser compensada por água desmineralizada.

Figura 19 – Circuito fechado de geração de vapor



Fonte: Autor (2018)

4.1.5.2 Usina de CO2

A usina de beneficiamento de CO2 é responsável pela purificação, armazenamento e distribuição do CO2 captado na fermentação da cerveja na Adegas.

O CO2 começa a ser captado quando atinge 95% de pureza nos tanques fermentadores da Adegas. Essa análise é feita de hora em hora após o enchimento do tanque e dosagem de fermento, onde o operador de Utilidades utiliza um instrumento chamado de Zhan para realizar análise de pureza nos tanques. Ao chegar na pureza ideal para captação o CO2 é direcionado para a Usina de beneficiamento.

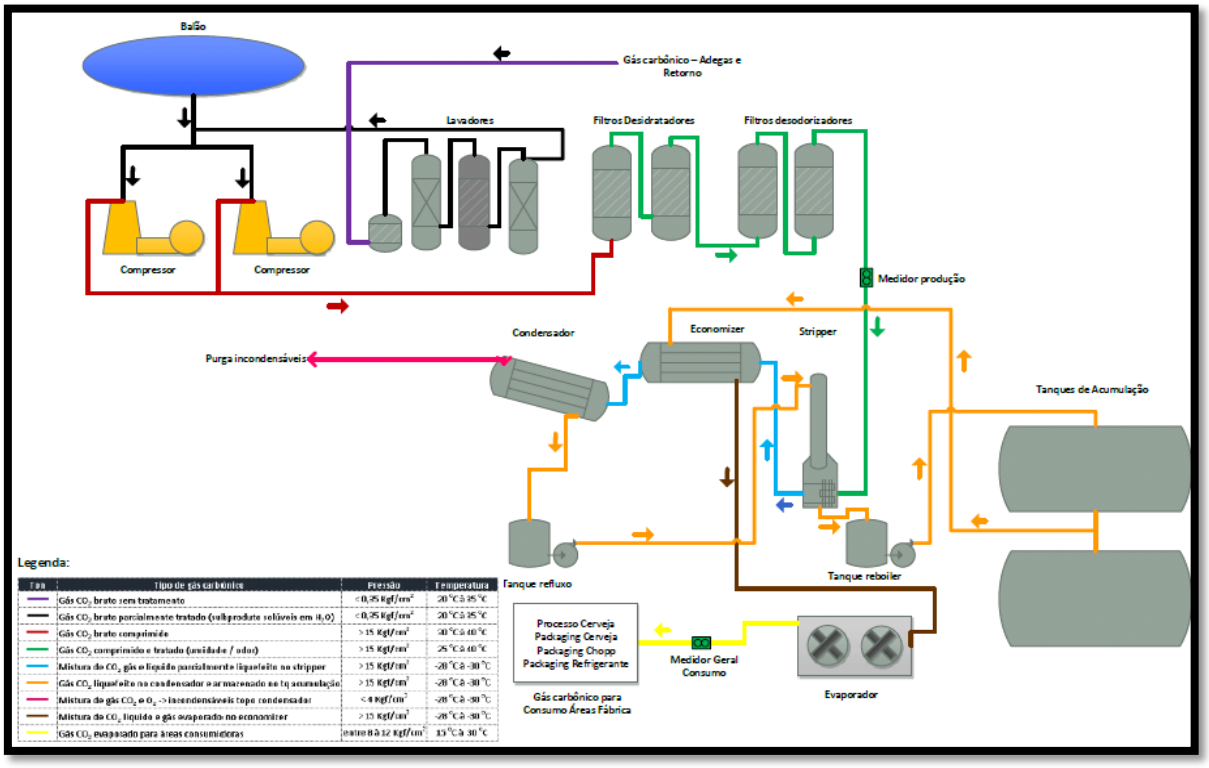
Ao chegar à Usina, o CO2 passa por um separador de espuma para retirar toda espuma que veio arrastada junto com o gás. Após isto, o gás sofre um processo de lavagem em série através de três lavadores. O Pré Lavador é responsável por retirar os álcoois do CO2, em seguida o Lavador de Permanganato retira os compostos de enxofre presentes. E por último, o Pós Lavador retira o residual de permanganato do gás carbônico.

O CO2 lavado é armazenado num balão de CO2 onde o mesmo serve como um pulmão para o funcionamento dos compressores que enviam o gás à alta pressão para a etapa de condensação e purificação.

Em seguida, inicia-se o processo de purificação por condensação, onde o CO2 é liquefeito através da refrigeração por um sistema fechado de amônia que condensa o CO2 e o armazena em estado líquido nos Tanques de CO2. Ao condensar, o gás se desprende dos gases incondensáveis responsáveis pela baixa pureza e contaminação do CO2. Sendo assim, é através desse processo de condensação que é purificado o CO2 para 99,999% de pureza.

A Figura 23 abaixo ilustra todo fluxo da Usina de beneficiamento de CO2.

Figura 20 – Fluxograma da Usina de beneficiamento de CO2



Fonte: Autor (2019)

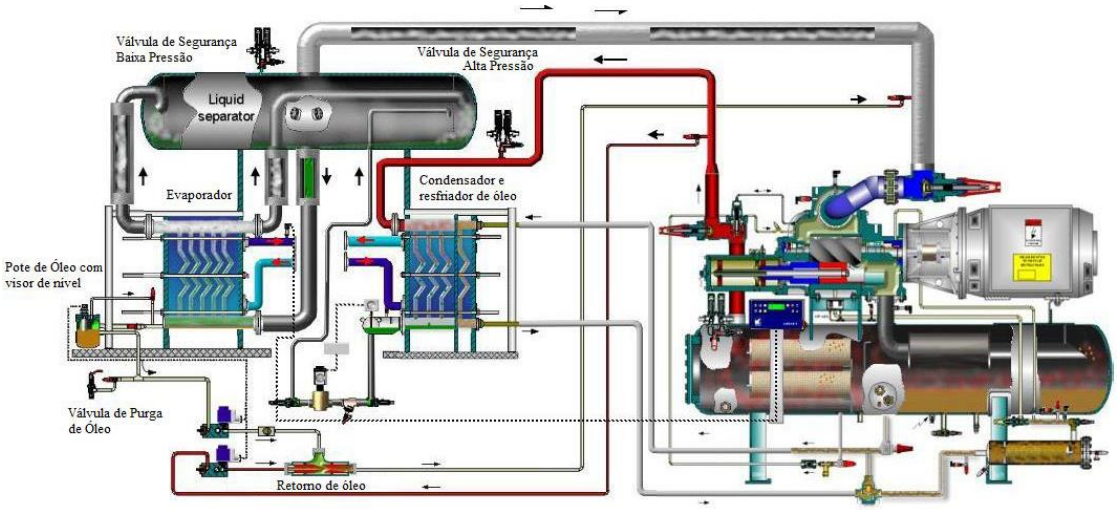
4.1.5.3 Sistema de refrigeração industrial

A Utilidades também é responsável pelo sistema de refrigeração industrial que fornece etanol a zero grau e a -3,5 graus para consumo de diversas áreas da cervejaria. Essa é uma área de alto risco devido à presença de amônia à alta pressão que é conhecida por ser uma substância extremamente perigosa.

O sistema de refrigeração é composto por 8 unidades compressoras (Chillers) que trabalham em série para refrigerar o etanol num circuito fechado. Cada unidade compressora trabalha num circuito fechado com amônia e troca calor com o etanol quente que vem do processo e volta frio para consumo do mesmo.

As unidades compressoras são compostas por compressores parafusos que trabalham num ciclo de refrigeração por compressão e expansão utilizando amônia como fluido refrigerante e etanol como fluido refrigerado. Isso pode ser visto na Figura 21 abaixo:

Figura 21 – Ciclo de refrigeração por compressão em Chillers



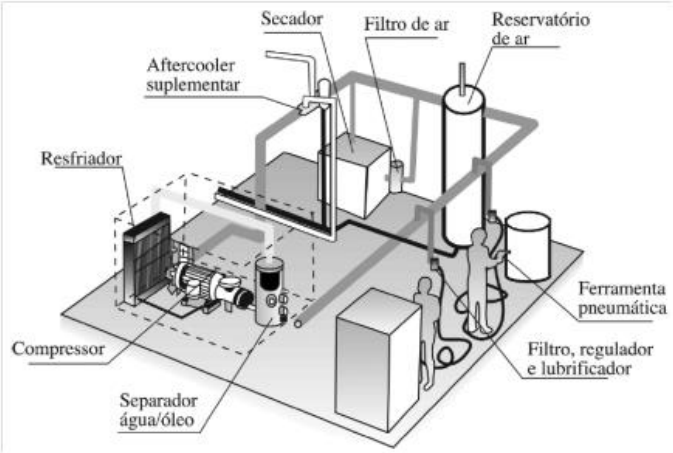
Fonte: Adaptado de YORK

4.1.5.4 Sistema de ar comprimido

A Utilidades fornece ar comprimido à 6 bar para toda a cervejaria com o principal objetivo de pilotar válvulas eletropneumáticas e diversas ferramentas pneumáticas distribuídas por toda planta.

O sistema é composto por 2 compressores parafusos de 2 estágios que comprimem o ar atmosférico e distribuem para a cervejaria como pode ser visto no Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma de compressão e distribuição de ar

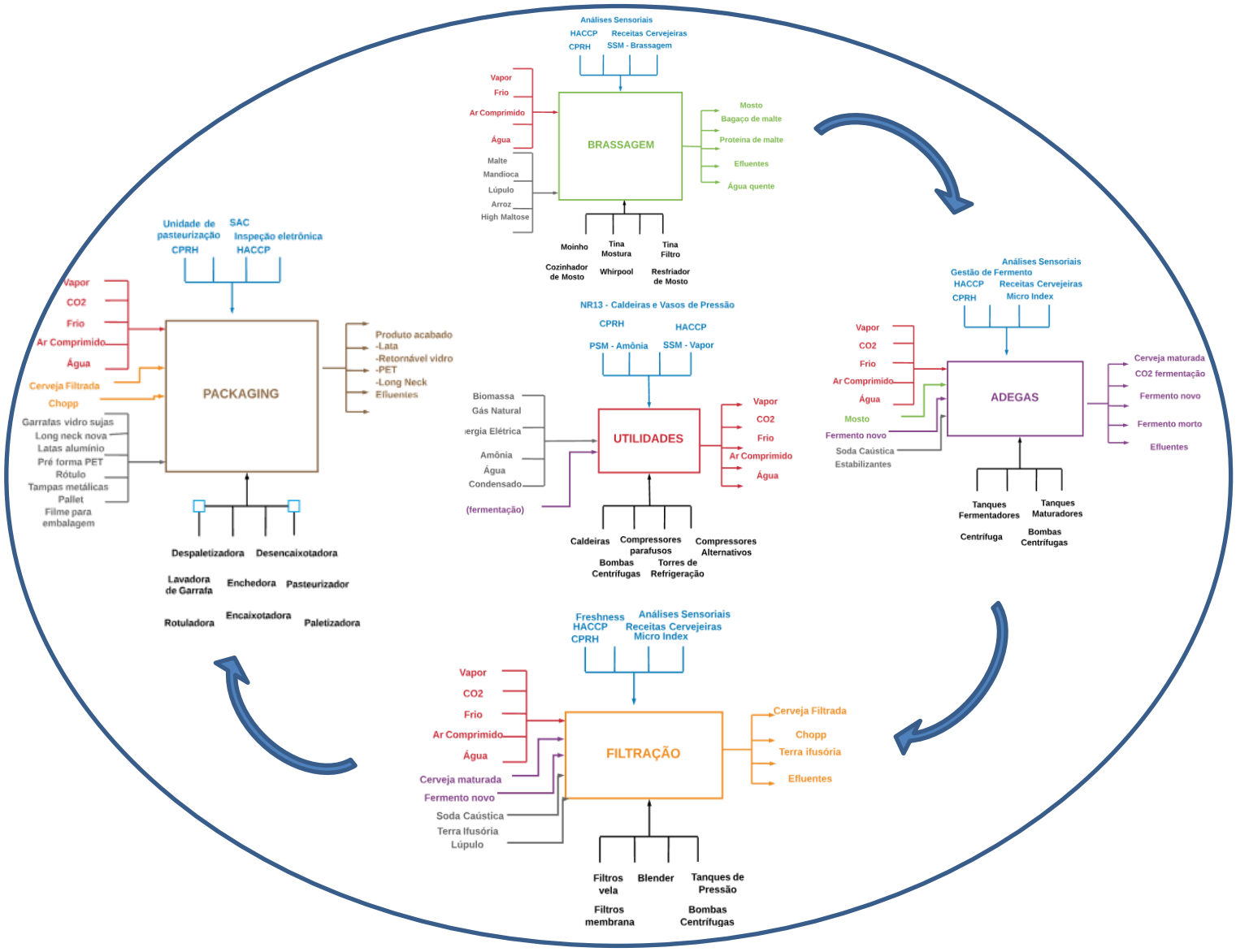


Fonte: ROCHA e MONTEIRO, 2005a

4.2 fluxograma fundamental

Para ilustrar tudo que falamos na seção 4.1, podemos observar na Figura 23 o digrama de blocos fundamentais que ilustra bem todas as interações entre áreas da cervejaria.

Figura 23 – Diagrama de blocos fundamentais da cervejaria

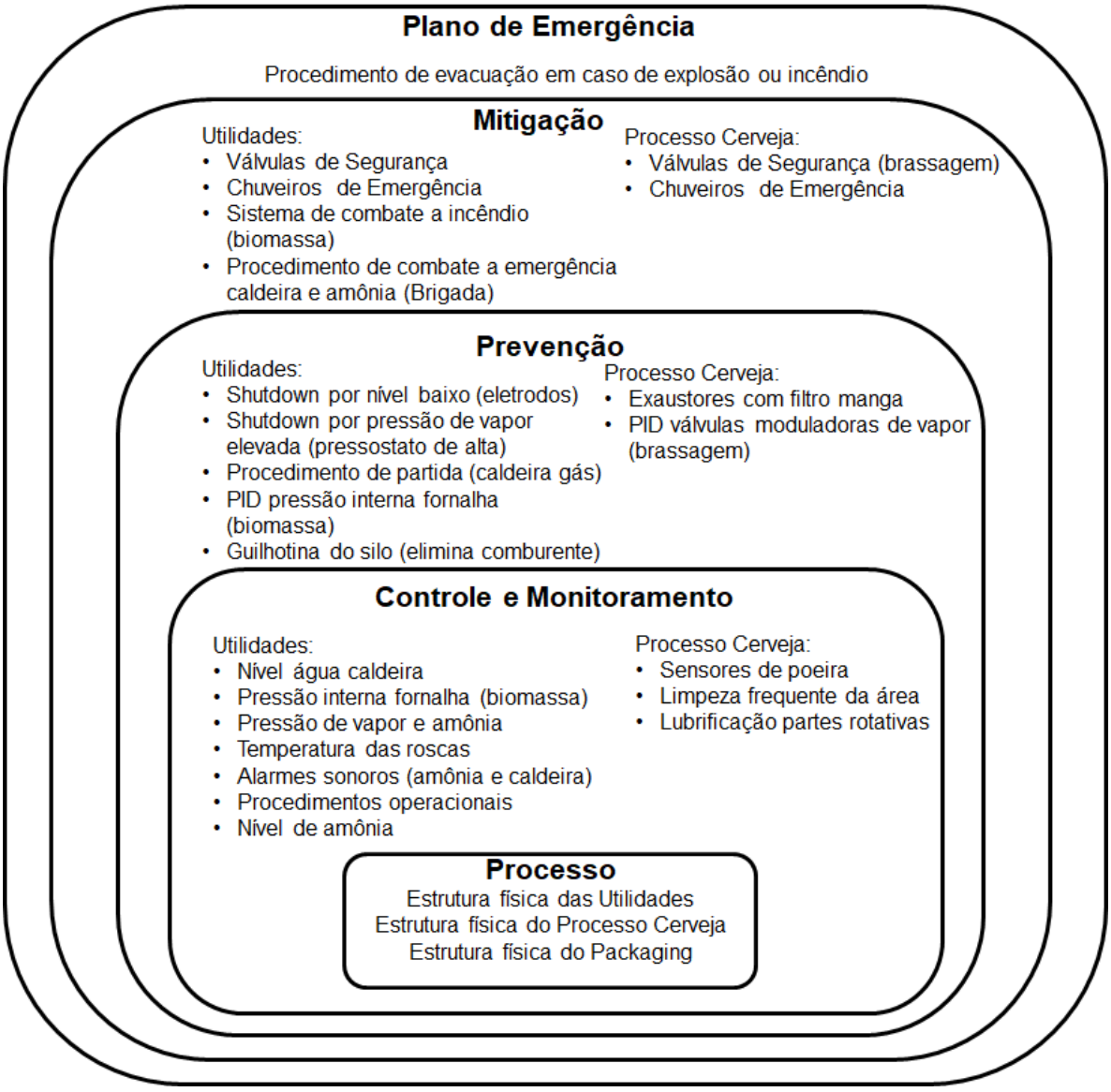


Fonte: Autor (2019)

4.3 PRINCIPAIS BARREIRAS DE PROTEÇÃO DA CERVEJARIA

Para ilustrar tudo que falamos na seção 4.1, podemos observar na Figura 24 as principais barreiras de proteção da cervejaria que podem comprometer a missão da cervejaria.

Figura 24 – Barreiras de proteção crítica da cervejaria



Fonte: Autor (2018)

4.4 definição das condições de contorno

Após a descrição detalhada das diversas áreas da cervejaria, é necessário identificar qual a sua área e equipamento crítico. Para isto utilizaremos a metodologia da AHP desenvolvida por Saaty (2001) como visto na seção 2.4.

Foi utilizado o software SuperDecisions para compilar os resultados da AHP e definir tanto a área, quanto o equipamento crítico da cervejaria.

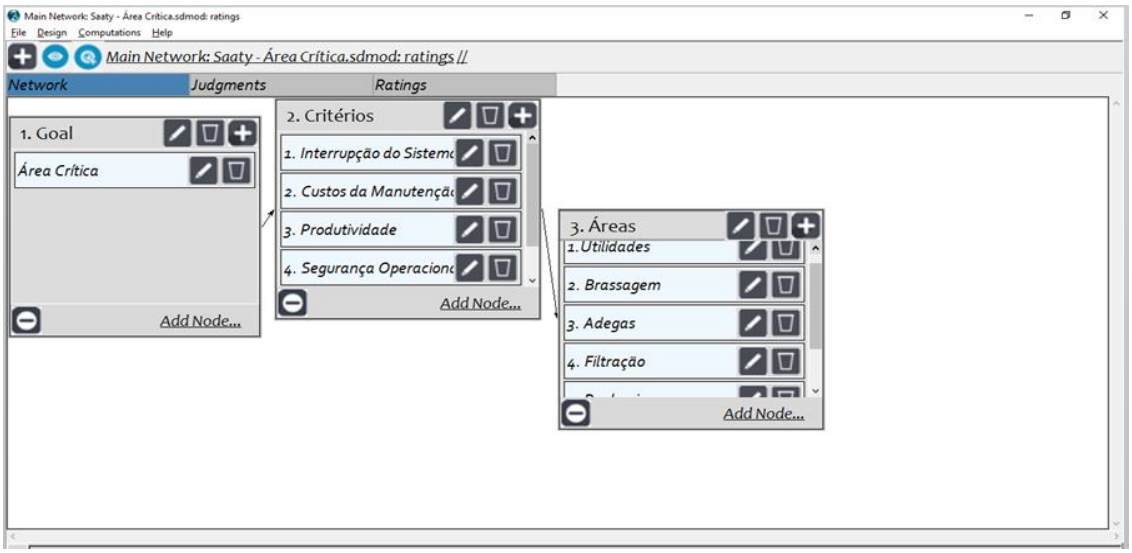
4.4.1 Definição da área crítica

Para definir a área crítica da cervejaria foram escolhidos os seguintes critérios de avaliação:

- **Interrupção do sistema** – Capacidade de uma falha na área de interromper o fluxo do sistema da cervejaria;
- **Custos de manutenção** – Custos necessários para manter o equipamento nas condições de projeto. E os custos associados a manutenção corretiva, os quais incluem custo com pessoas, peças de reposição e interrupção da produção.
- **Produtividade** – Reflete o impacto da área em parâmetros como quantidade produzida e propriedades do produto final;
- **Segurança operacional** – Referente aos riscos associados nas áreas e a existência de atividades insalubres;
- **Meio ambiente** – Capacidade de danos ambientais causados pelos efluentes e resíduos de uma área.

Foram inseridos os critérios acima no SuperDecisions, como ser visto na Figura 25, e feita a avalição entre os critérios utilizando os valores da Tabela 2. Todas as avaliações foram feitas de acordo com o conhecimento e julgamento do autor escritor deste estudo.

Figura 25 – AHP geral da área crítica



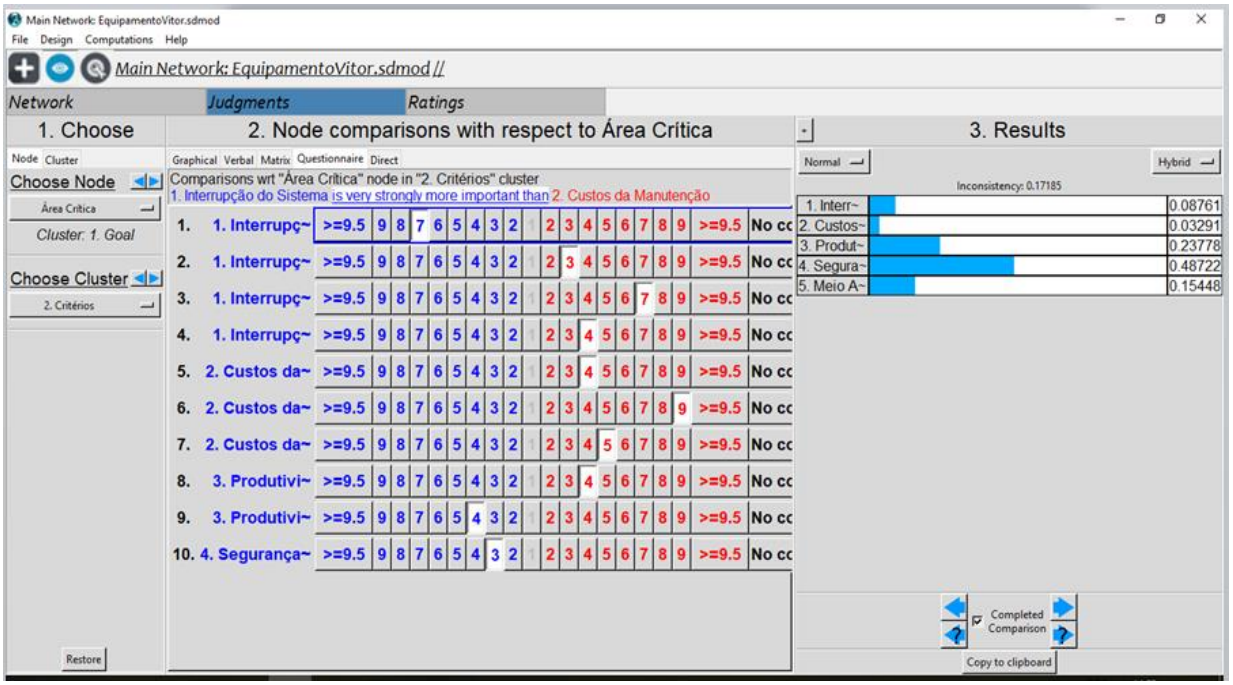
Fonte: Autor (2019)

Depois de compilado os dados, foi visto que Segurança operacional é o critério mais relevante para definição da área crítica com 48,72% de peso, seguido de Produtividade com 23,77%, Meio Ambiente com 15,44%, Interrupção do sistema com 8,76% e Custos de manutenção com 3,29% como pode ser visto na Figura 26 abaixo.

O próximo passo foi avaliar as áreas de Utilidades, Brassagem, Adegas, Filtração e Packaging em cada um dos critérios acima, a fim de identificar a área crítica. A matriz comparação das áreas pode ser vista na Figura 27.

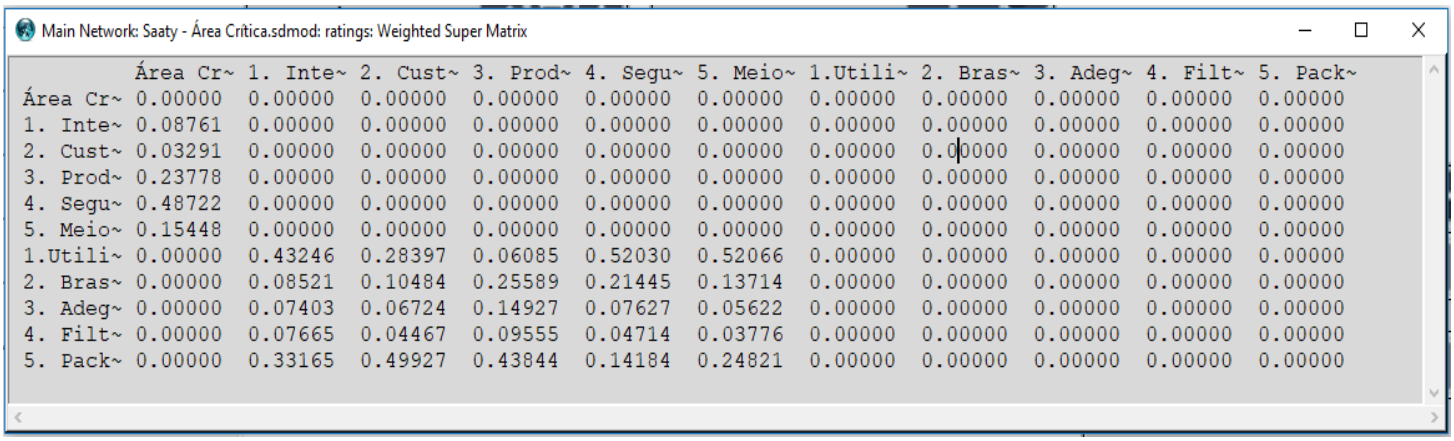
Os resultados finais do SuperDecisions apontaram a Utilidades como área mais crítica da cervejaria com 39,5% seguido de Packaging com 25,6%, Brassagem com 19,7%, Adegas com 11% e Filtração com 7,3% como pode ser visto na matriz normalizada da Figura 28.

Figura 26 – Resultado dos pesos dos critérios de definição da área crítica



Fonte: Autor (2019)

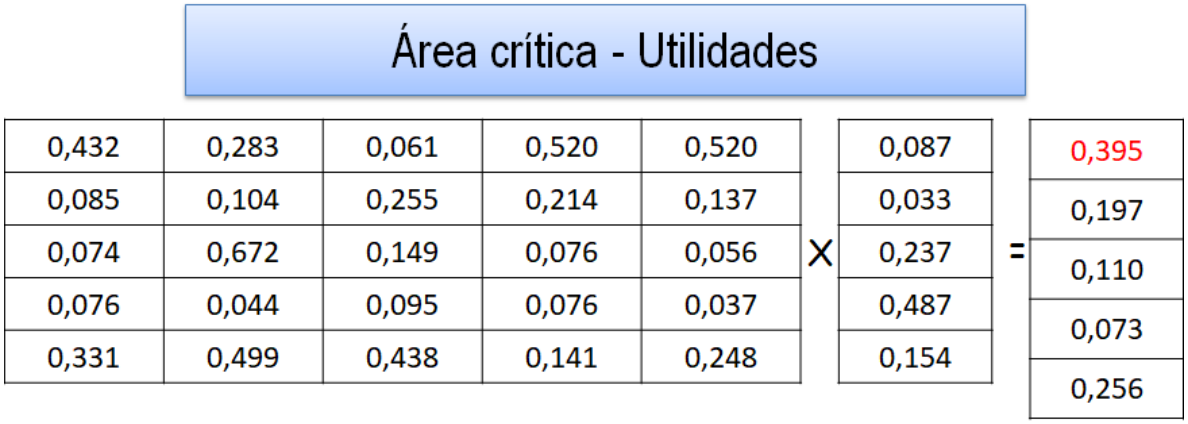
Figura 27 – Matriz comparação da área crítica



	Área Cr~	1. Inte~	2. Cust~	3. Prod~	4. Segu~	5. Meio~	1.Utili~	2. Bras~	3. Adeg~	4. Filt~	5. Pack~
Área Cr~	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1. Inte~	0.08761	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2. Cust~	0.03291	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3. Prod~	0.23778	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4. Segu~	0.48722	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5. Meio~	0.15448	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.Utili~	0.00000	0.43246	0.28397	0.06085	0.52030	0.52066	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2. Bras~	0.00000	0.08521	0.10484	0.25589	0.21445	0.13714	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3. Adeg~	0.00000	0.07403	0.06724	0.14927	0.07627	0.05622	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4. Filt~	0.00000	0.07665	0.04467	0.09555	0.04714	0.03776	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5. Pack~	0.00000	0.33165	0.49927	0.43844	0.14184	0.24821	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Fonte: Autor (2019)

Figura 28 – Resultado matriz normalizada



Fonte: Autor (2019)

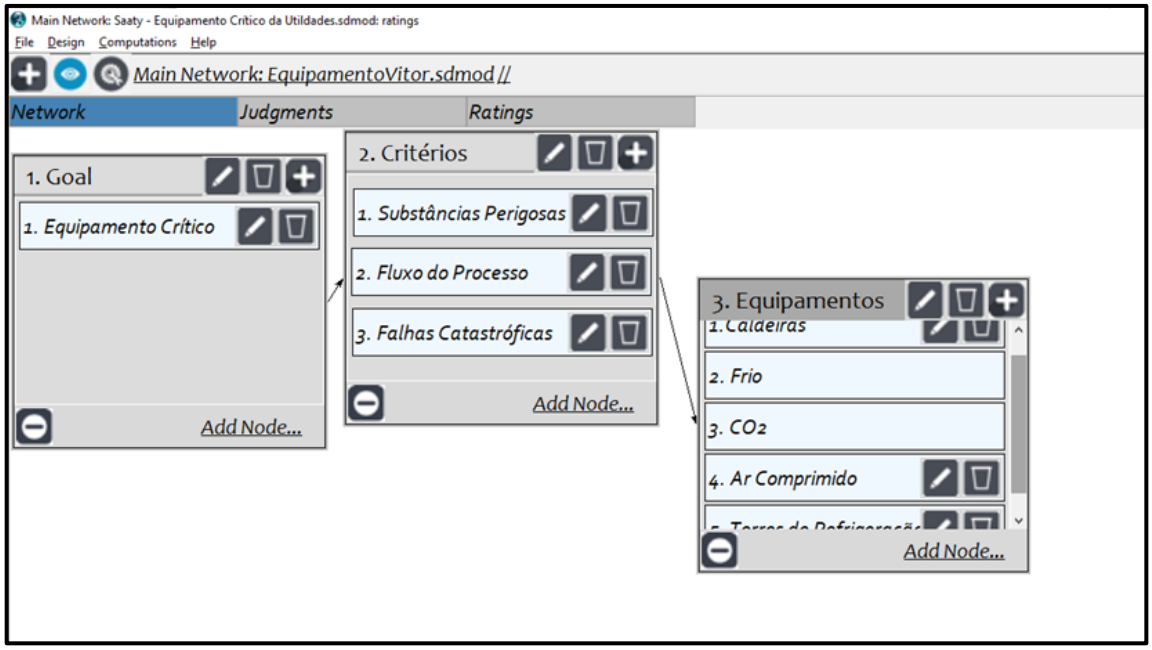
4.4.2 Definição do equipamento crítico

Após a identificação da Utilidades como área crítica, é necessário identificar qual é o equipamento mais crítico desta área. Para isto foram definidos os seguintes critérios de avaliação:

- **Substâncias perigosas –** Remete as substâncias perigosas à saúde humana e ambiental;
- **Falhas catastróficas –** Remete ao risco de uma falha no equipamento ter uma consequência catastrófica como morte ou danos irreversíveis as pessoas e ao meio ambiente;
- **Fluxo do processo –** Remete a capacidade de uma falha no equipamento interromper o fluxo do processo da cervejaria.

Foram inseridos os critérios acima no SuperDecisions, como ser visto na Figura 29, e feita a avalição entre os critérios utilizando os valores da Tabela 2. Todas as avaliações foram feitas de acordo com o conhecimento e julgamento do autor escritor deste estudo.

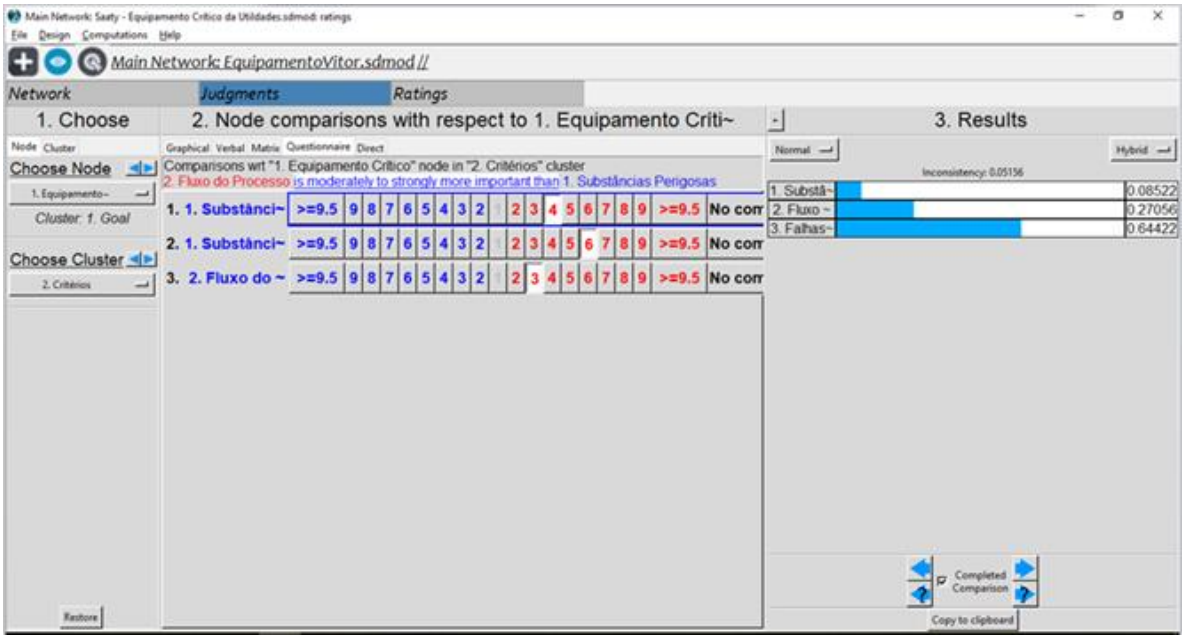
Figura 29 – AHP geral do equipamento crítico



Fonte: Autor (2019)

Depois de compilado os dados, foi visto que Falha catastrófica é o critério mais relevante para definição do equipamento crítico com 64,42% de peso, seguido de Fluxo de processo com 27,05% e Substâncias perigosas com 8,52% como pode ser visto na Figura 30 abaixo.

Figura 30 – Resultado dos pesos dos critérios de definição do equipamento crítico

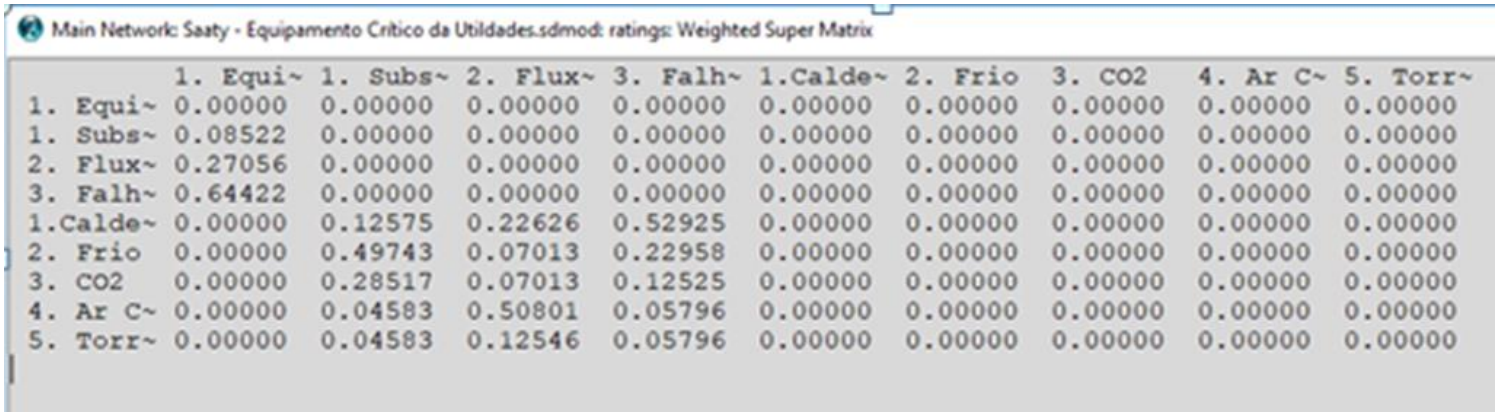


Fonte: Autor (2019)

O próximo passo foi avaliar os equipamentos da Utilidades como caldeiras, compressores de frio (Chillers), Usina de beneficiamento de CO2, compressores de ar e torres de refrigeração em cada um dos critérios acima, a fim de identificar o equipamento crítico como pode ser visto na Figura 29.

Os resultados finais, Figura 32, do SuperDecisions apontaram a caldeira como equipamento mais crítico da Utilidades com 41,2% seguido de Frio com 20,9%, Ar comprimido com 17,8%, CO2 com 12,4% e Torres de refrigeração com 10,9%.

Figura 31 – Matriz comparação do equipamento crítico

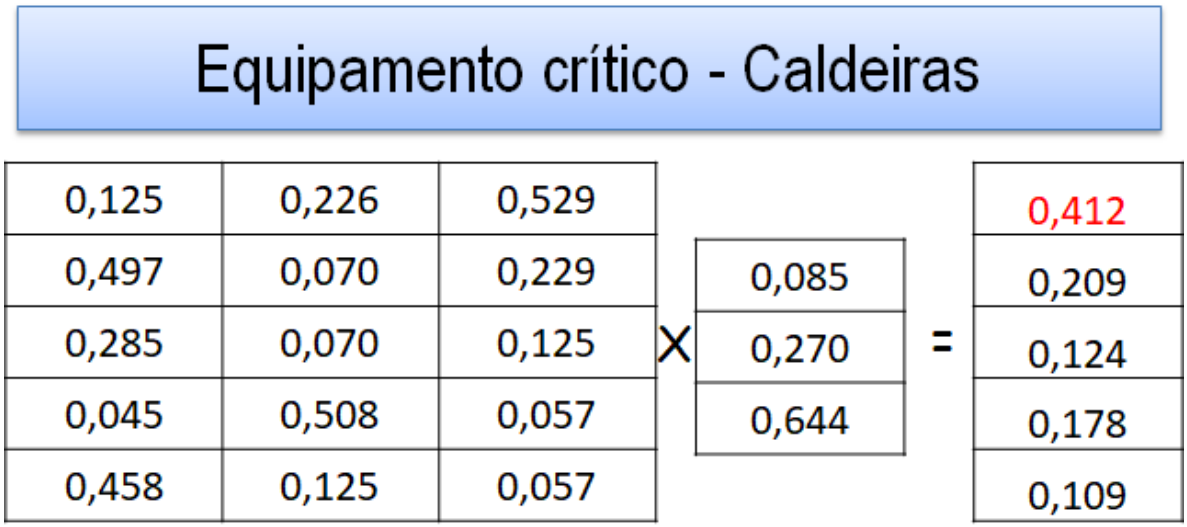


Main Network: Saaty - Equipamento Critico da Utildades.sdmod: ratings: Weighted Super Matrix

	1. Equi~	1. Subs~	2. Flux~	3. Falh~	1.Calde~	2. Frio	3. CO2	4. Ar C~	5. Torr~
1. Equi~	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1. Subs~	0.08522	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2. Flux~	0.27056	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3. Falh~	0.64422	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.Calde~	0.00000	0.12575	0.22626	0.52925	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2. Frio	0.00000	0.49743	0.07013	0.22958	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3. CO2	0.00000	0.28517	0.07013	0.12525	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4. Ar C~	0.00000	0.04583	0.50801	0.05796	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5. Torr~	0.00000	0.04583	0.12546	0.05796	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Fonte: Autor (2019)

Figura 32 – Matriz comparação do equipamento crítico



Equipamento crítico - Caldeiras

0,125	0,226	0,529			0,412
0,497	0,070	0,229	0,085		0,209
0,285	0,070	0,125	X 0,270	=	0,124
0,045	0,508	0,057	0,644		0,178
0,458	0,125	0,057			0,109

Fonte: Autor (2019)

4.5 DIAGRAMAS LÓGICOS ÚNICOS E CONTÍNUOS

É de fundamental importância na compreensão do problema uma clara inter-relação e interdependência dos eventos. É surpreendente que os diagramas lógicos disponíveis hoje, como mencionado nas seções 2.3.1 e 2.3.2, a Árvore de Eventos (AE) e Árvore de Falhas (AF) não nos permitem visualizar a interdependência de eventos que podem levar a um acidente. Portanto, diagramas lógicos que comunicam como os eventos podem ser conectados são fundamentais para identificar os perigos do sistema.

Com o objetivo de melhor comunicar e contribuir na análise do comportamento de construções em situações de incêndio, Fitzgerald (2004) propôs o emprego de dois tipos de estruturas em rede: *Single Value Networks* (Diagramas Únicos – DU) e *Continuous Value Networks* (Diagramas Contínuos – DC). Os quais serão a base para a estruturação que será proposta neste trabalho para a identificação do perigo, já que favorecem a visualização da dependência entre seus galhos e incorporam o tempo na análise.

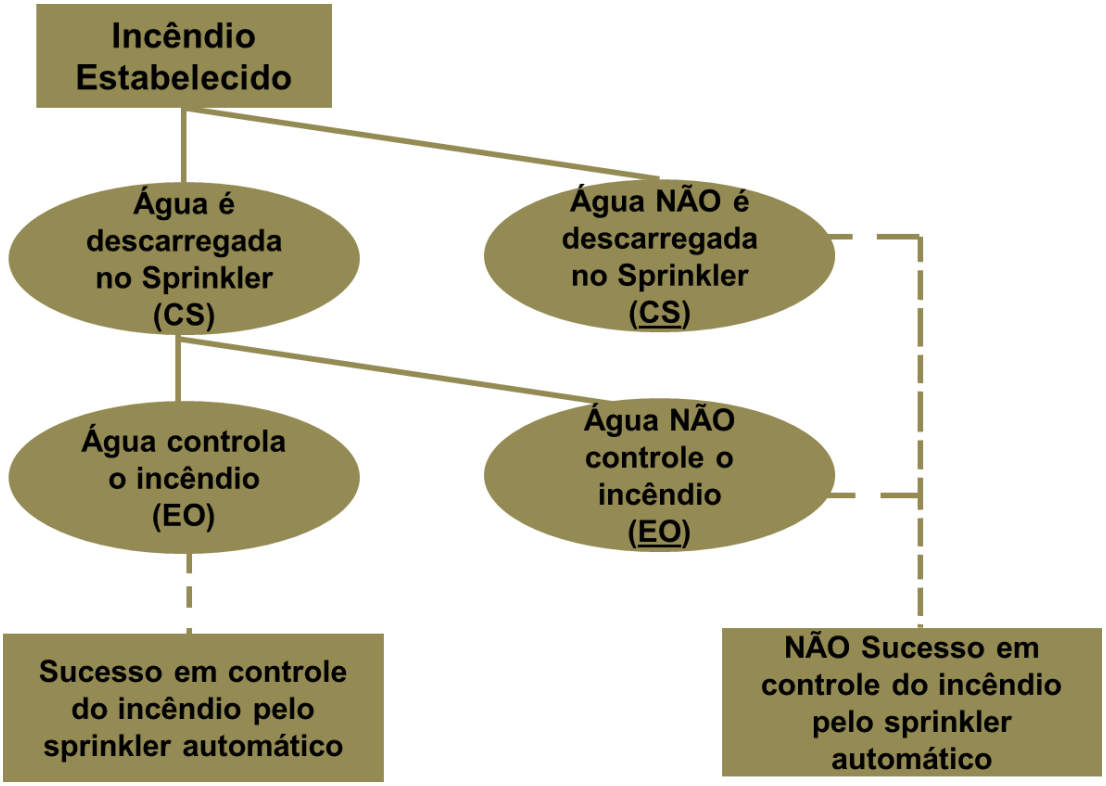
Os Diagramas Contínuos são análogos a uma imagem em movimento. Eles começam com um evento específico e identifica a futura cadeia de eventos que fornece um cenário de possíveis resultados. Esse tipo de diagrama permite concentrar-se numa sequência de eventos que ajudam a identificar suas interdependências e podem incorporar o tempo no processo.

Já os Diagramas Únicos possuem a mesma estrutura que os Diagramas Contínuos, porém eles permitem que alguém pare em qualquer instante ou evento desejado e avalie detalhadamente causas e condições naquele momento, como uma fotografia. Esse tipo de análise pode fornecer a informação do que aconteceria naquele instante de tempo. A coordenação dos Diagramas Únicos e Contínuos dá uma visão valiosa da compreensão do desempenho. A seleção astuta de células para um estudo detalhado pode resultar numa identificação do perigo eficiente.

Para construir DU’s e DC’s, parte-se de um evento iniciador localizado no topo do diagrama lógico, então são desenvolvidas as possíveis cadeias de eventos resultantes, ou seja, os possíveis cenários. Assim para cada patamar do diagrama, têm-se as possibilidades de sucesso ou falha de um item ou situação.

A Figura 33 ilustra a forma hierárquica dos DU's e DC's. Neste exemplo, a avaliação incorpora dois componentes principais. O primeiro avalia a confiabilidade do sistema (CS) para fornecer água a um sprinkler. A segunda estima a eficácia operacional (EO) do sistema de sprinklers para controlar um incêndio de tamanho especificado, uma vez que a água será emitida por um sprinkler. A confiabilidade é avaliada uma vez para todo o sistema ou zona, enquanto a eficácia operacional é avaliada para cada tamanho de fogo selecionado para análise (Fitzgerald, 2004)

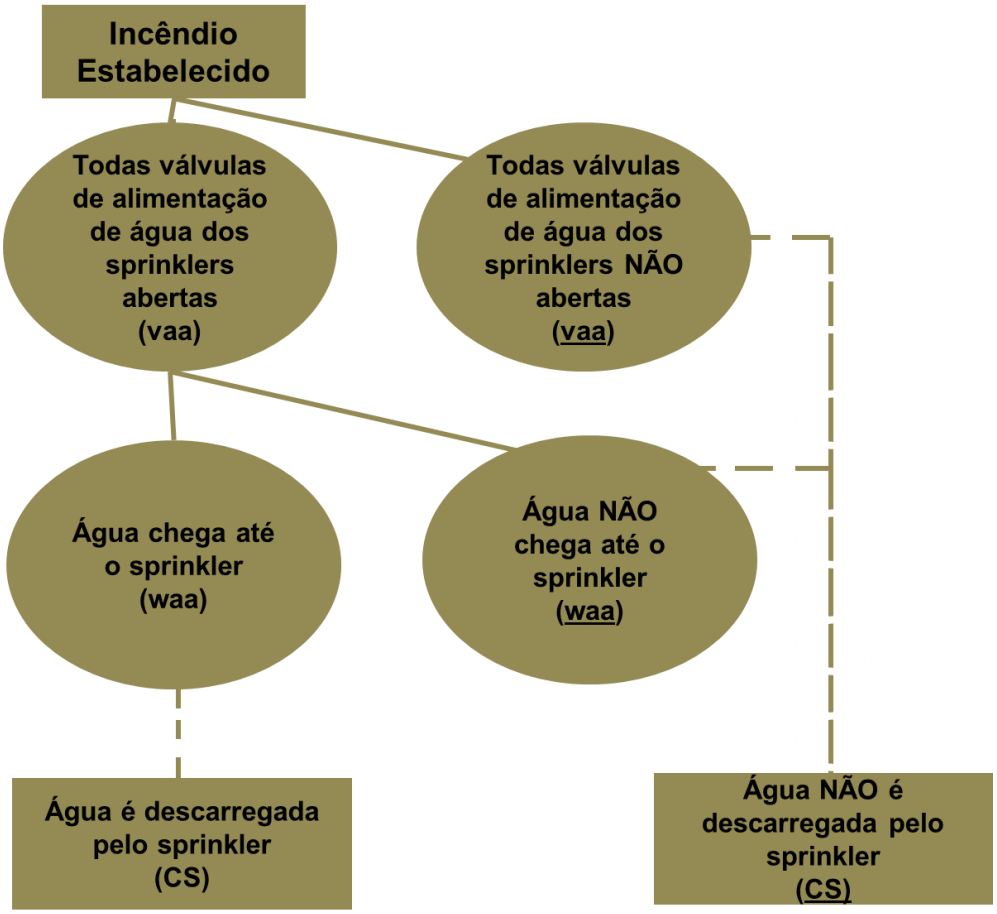
Figura 33 - Exemplo de DU avaliando situação de incêndio estabelecido



Fonte: Adaptado de Fitzgerald (2004, p. 6/6)

A independência, a dependência e a condicionalidade dos eventos são incorporadas em todas as redes de construção dos Diagramas Únicos e Contínuos. Essas considerações são importantes para as avaliações, embora não sejam um problema nos cálculos. Por exemplo, eventos "vaa" (todas as válvulas estão abertas) e "waa" (a água atingirá o sprinkler) são independentes. Como cada evento é avaliado independentemente do outro, sua ordem na Figura 34 não é importante para avaliar a Confiabilidade do Sistema. O resultado (tanto na compreensão quanto nos valores numéricos) será idêntico, independentemente do seu pedido.

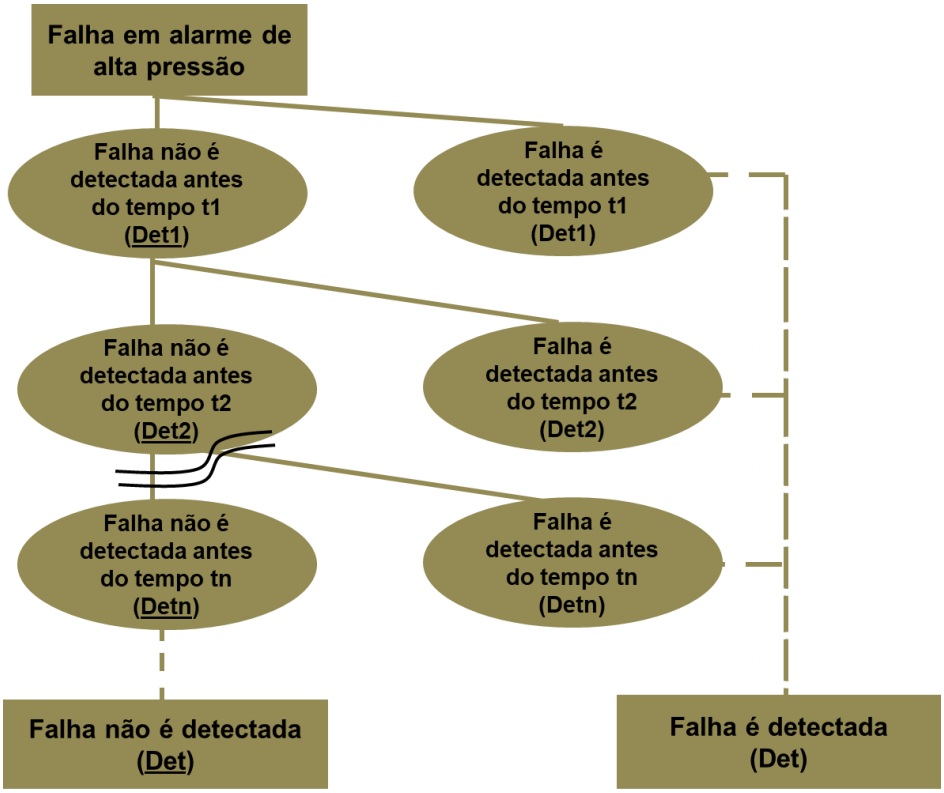
Figura 34 – Exemplo de DU avaliando a Confiabilidade do Sistema (CS)



Fonte: Adaptado de Fitzgerald (2004, p. 6/7)

Tendo em vista a apresentação desses diagramas, a grande vantagem deles é a possibilidade de incorporar tempo (Figura 35) à análise e também o fato de viabilizar uma melhor visualização da dependência e independência entre eventos.

Figura 35 - Exemplo de DC com cenários de detecção ou não da falha de alarme



Fonte: Autor (2018)

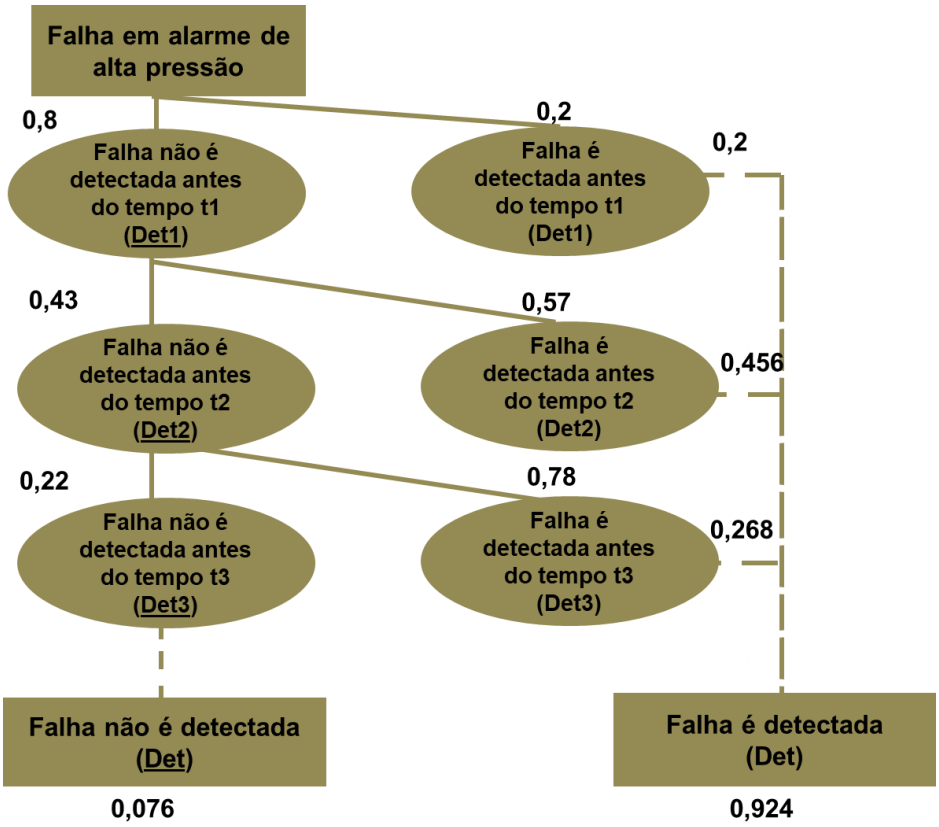
Em termos de cálculo, a cada evento pode ser atribuída uma probabilidade de ocorrência, sendo esta normalmente exibida nas linhas que separam os eventos, conforme a Figura 36. Logo, para obter a probabilidade de um cenário basta multiplicar os valores das probabilidades presentes no caminho contínuo que representa ele. E para determinar o resultado final até qualquer ponto do diagrama devem-se somar as probabilidades dos diferentes caminhos até o mesmo (probabilidade acumulada), como no exemplo a seguir.

Lembrando sempre que cada altura desses diagramas apresenta eventos complementares, assim, a soma da probabilidade de cada nível sempre será 1. Usando como exemplo a Figura 36:

$$P(Det1) + P(\underline{Det1}) = 1$$

Onde a notação P(Det1) indica a probabilidade da falha ser detectada antes do tempo t1 e a notação P(Det1) indica a probabilidade da falha não ser detectada antes do tempo t1.

Figura 36 – DC exemplo para cálculo de probabilidade



Fonte: Autor (2018)

No exemplo da Figura 36 é possível observar dentre outras as seguintes informações:

- Probabilidade da falha do alarme de alta pressão ser detectada antes do tempo t1: P(Det1)=0,2;
- Probabilidade da falha de alarme não ser detectada antes de t1: P(Det1)= 0,8;
- Probabilidade da falha ser detectada antes do tempo t2, visto que não foi detectada antes de t1: 0,57;

- Probabilidade da falha não ser detectada antes do tempo t2, visto que não foi detectada antes de t1: 0,43;
- Probabilidade da falha ser detectada antes do tempo t3, visto que não foi detectada antes de t2: 0,78;
- Probabilidade da falha não ser detectada antes do tempo t3, visto que não foi detectada antes de t2: 0,22;

Seguindo o raciocínio explicado anteriormente para determinar a probabilidade de ocorrência de cenários, no extremo direito da Figura 36, sobre as linhas tracejadas, encontram-se as probabilidades de detecção da falha de cada caminho. Assim, por exemplo, a probabilidade do cenário:

Falha em alarme de alta pressão → **Det1** → **Det2** → ***FALHA É DETECTADA*** seria **0,456** conforme cálculo abaixo.

$$P(Det2/\overline{Det1}) = 0,8 * 0,57 = 0,456$$

Já a probabilidade acumulada de a falha ser detectada até o tempo t2 seria dada por:

$$P(Det2) = P(Det1) + P(Det2/\overline{Det1}) = 0,2 + 0,456 = 0,656$$

Onde os símbolos – e / significam respectivamente *não* e *dado que.*

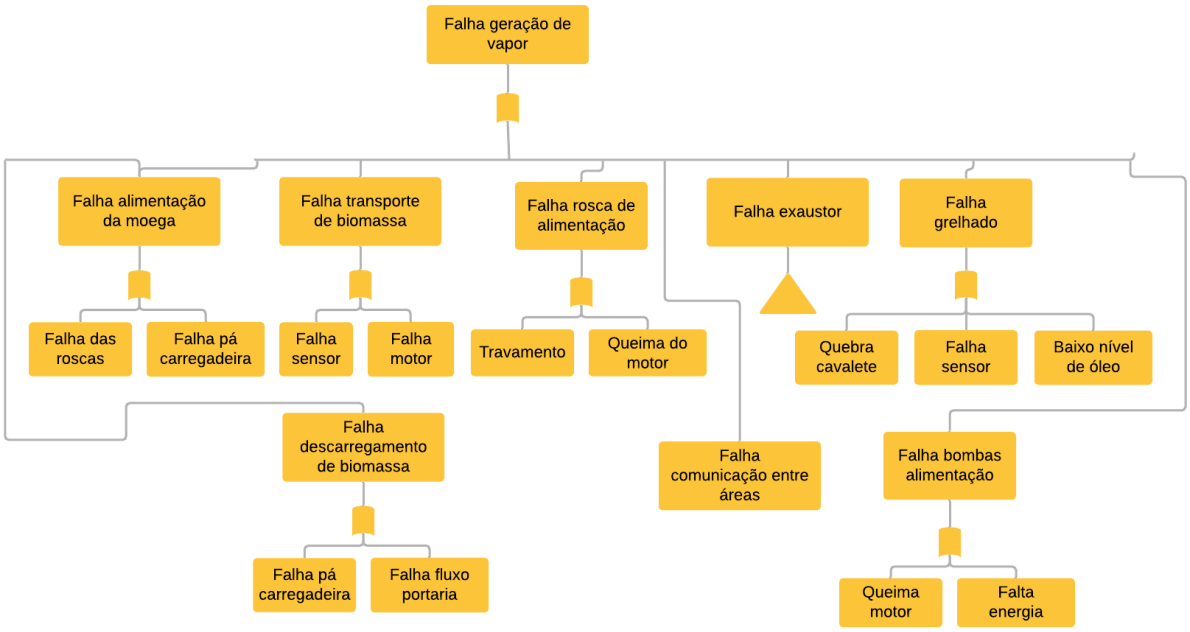
Portanto, considerando todos os tempos, a probabilidade total da falha do exemplo ser detectada P(Det) seria 0,2 + 0,456 + 0,286 = 0,924.

Para Diagramas Únicos os cálculos seguem o mesmo pensamento. Contudo, como visto que esses diagramas focam em um único momento do tempo, deixa-se de ter uma coordenada dinâmica na análise e tem-se apenas a análise do sucesso (Ex.: na Figura 34 só o sucesso é avaliado, não há variável dinâmica), não fazendo sentido o cálculo de probabilidades acumulada para cada ponto.

4.6 estudo de caso

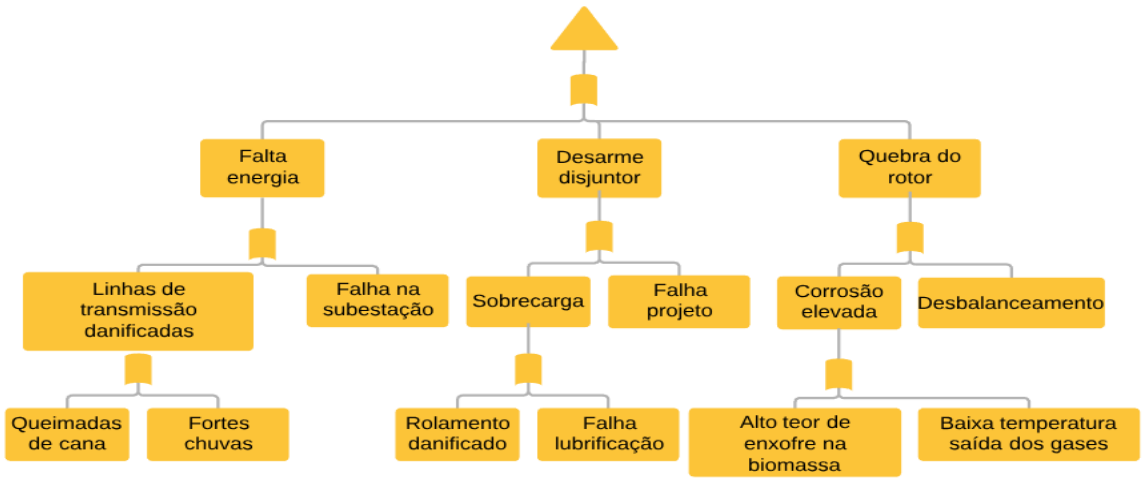
De forma a dar sentido ao que foi exposto anteriormente, imagina-se o que pode dar errado e como pode dar errado no processo de geração de vapor pelas caldeiras de biomassa. Temos então uma AF representada pela Figura 37 abaixo.

Figura 37 – AF falha na geração de vapor



Fonte: Autor (2019)

Figura 38 – AF falha no exaustor



Fonte: Autor (2019)

Percebemos que pela AF da Figura 37 acima é possível visualizar todas as falhas que podem acontecer que levariam para a falha da geração de vapor. Entretanto, não conseguimos visualizar a sequência dessas falhas no tempo e como elas se comportam. Além disso, nas Figuras 37 e 38 (falha na geração de vapor e

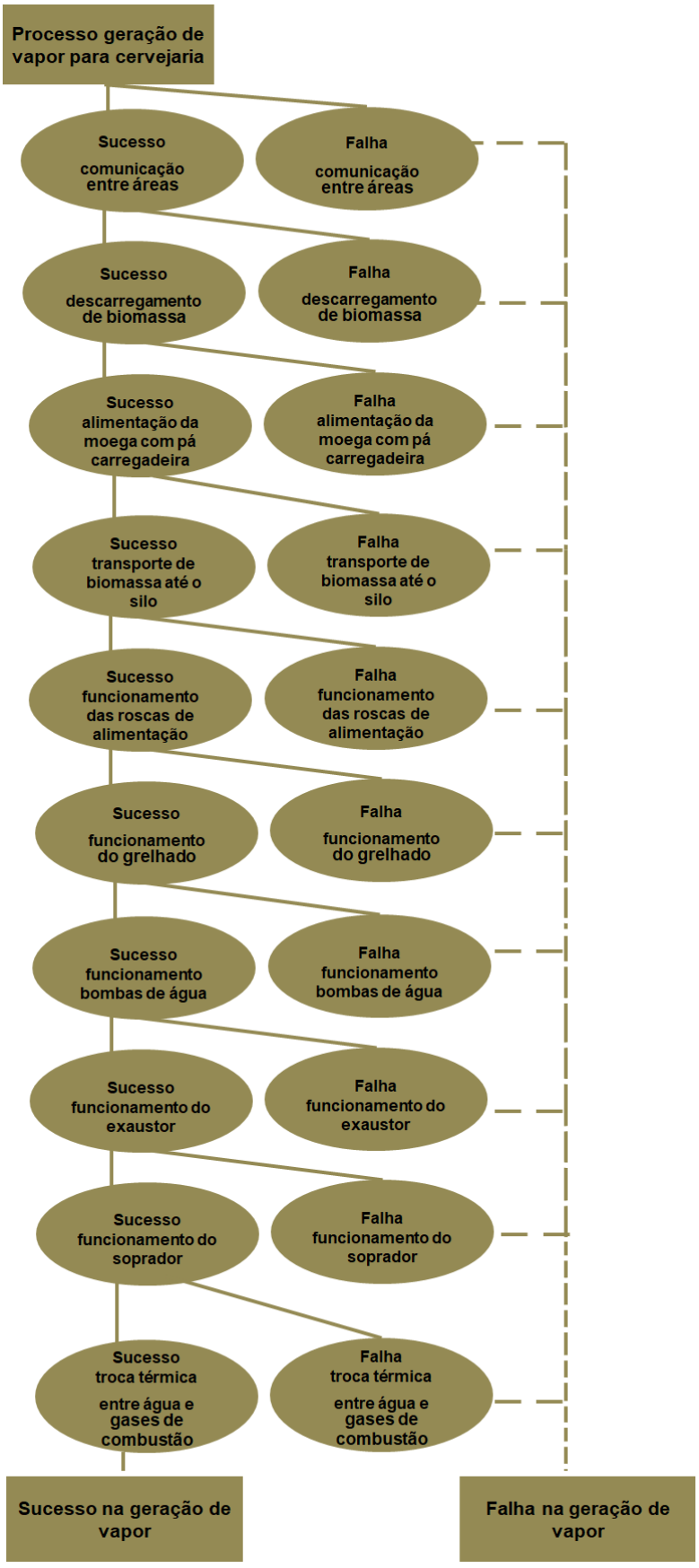
exaustor) só conseguimos ver como a falha pode dar errado, mas não conseguimos visualizar o que pode dar errado caso essas falhas aconteçam.

Para poder visualizar no tempo a sequência dessas falhas e o que pode dar errado, caso aconteçam, foi representado na Figura 39 o Diagrama Contínuo para o processo de geração de vapor na caldeira de biomassa. Neste DC conseguimos visualizar a sequência no tempo de como os modos de falha que podem ocasionar a falha na geração de vapor para cervejaria se comportam. Além disso, é importante notar que algumas dessas falhas fazem parte das barreiras de proteção crítica da cervejaria, vide Figura 24 .

Sendo assim, iremos dar um zoom em algumas falhas específicas, que fazem parte das barreiras de proteção crítica da cervejaria, utilizando os diagramas únicos para identificar os principais perigos associadas a estas falhas e o que pode dar errado caso elas aconteçam.

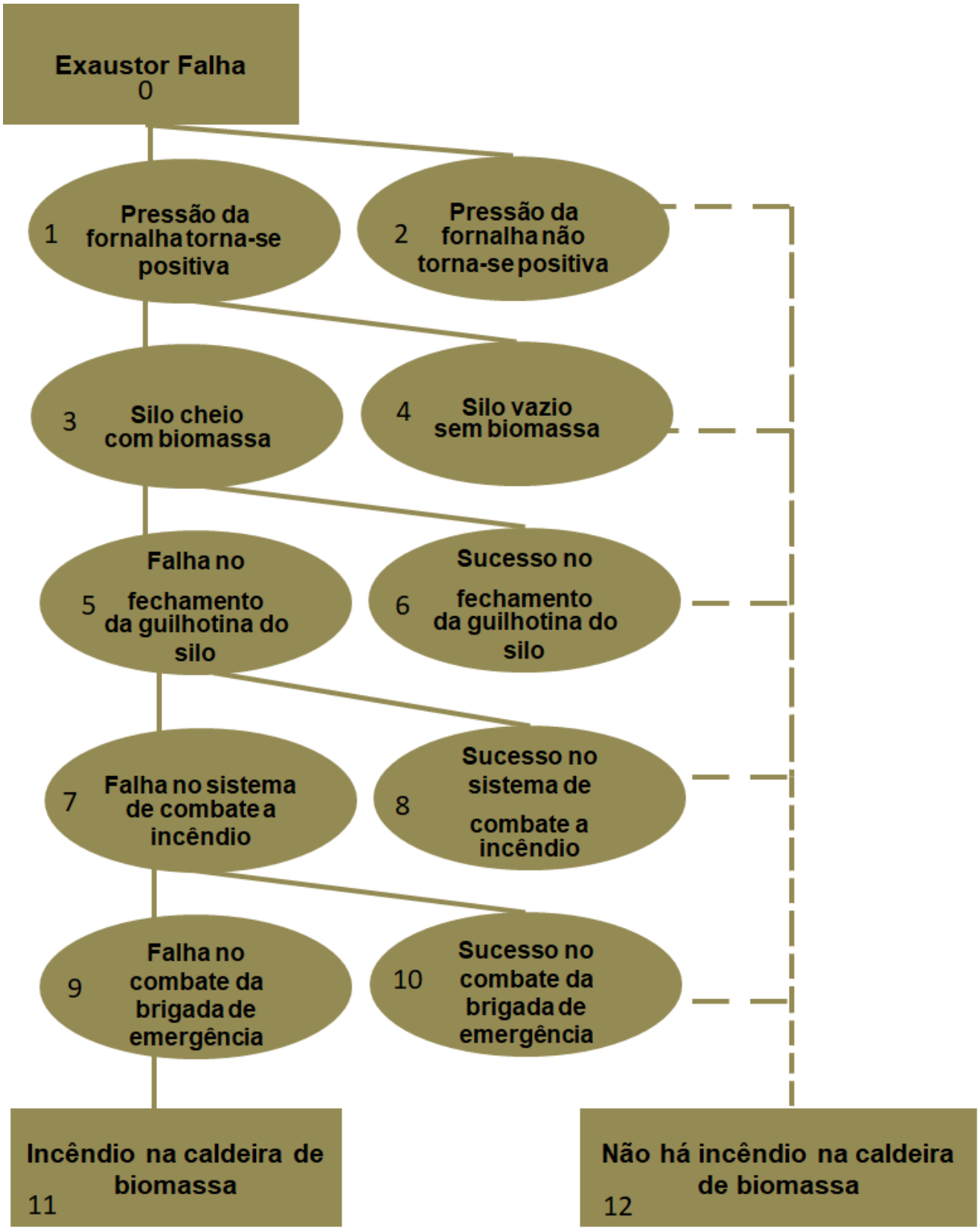
Sendo assim, foi dado um zoom na falha do exaustor, que é uma das barreiras de proteção crítica da cervejaria. O diagrama único, representado pela Figura 40 identifica os principais perigos associadas a esta falha e o que pode dar errado caso ela aconteça.

Figura 39 – Diagrama contínuo de geração de vapor para cozinhador de mosto



Fonte: Autor

Figura 40 – Diagrama único exaustor em falha



Fonte: Autor

O cenário representado pelo trajeto 0-2 mostra que um incêndio na caldeira não ocorrerá se a pressão interna da fornalha não se tornar positiva.

O cenário representado pelo trajeto 0-1-4 mostra que mesmo se a pressão interna na caldeira se tornar positiva, não ocorrerá incêndio, já que o silo não contém biomassa (combustível).

O cenário representado pelo trajeto 0-1-3-6 mostra que mesmo com biomassa no silo, não haverá incêndio se a guilhotina do silo fechar (camada de prevenção da barreira de proteção). Quando a guilhotina do silo fecha, significa que não há entrada de ar no sistema e consequentemente a combustão ou incêndio não se estabelece por falta de comburente.

O cenário representado pelo trajeto 0-1-3-5-8 mostra que o incêndio não se perpetuará, mesmo com a presença do combustível (biomassa no silo), comburente (oxigênio no silo) e fonte de ignição (fogo vindo da fornalha), se o sistema de combate a incêndio atuar (camada de mitigação da barreira de proteção). Ele injeta condensado em cima das roscas de alimentação e dentro do silo fazendo com que o incêndio não ocorra.

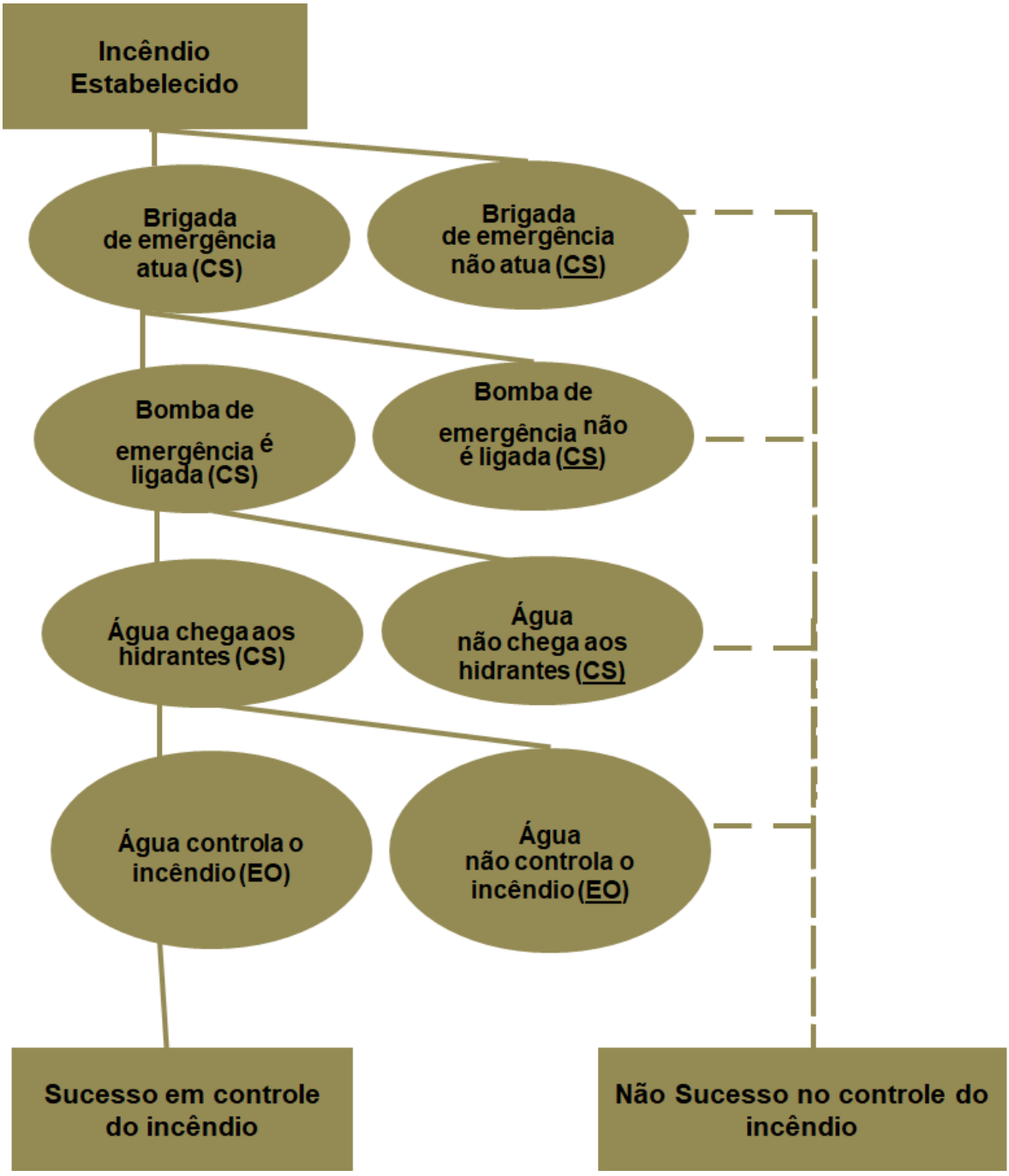
O cenário representado pelo trajeto 0-1-3-5-7-10 mostra que o incêndio não se perpetuará se a brigada de emergência atuar de forma correta no silo da caldeira (camada de mitigação da barreira de proteção). Existem várias linhas de hidrante próximas ao silo onde a Brigada é treinada para montá-las rapidamente, a tempo de combater o princípio de incêndio nas roscas e no silo de alimentação.

Entretanto, se todas essas barreiras de proteção falharem, é certo que o incêndio se perpetuará. Restando apenas evacuar a área (Plano de emergência da barreira de proteção) para evitar acidentes com os colaboradores que trabalham nas caldeiras. A presença na área torna-se restrita aos brigadistas de emergência que irão tentar evitar que o incêndio, já estabelecido se alastre para outras áreas como o transporte e o galpão de biomassa.

Tendo em vista o cenário do incêndio já estabelecido, podemos utilizar um DU para avaliar como a confiabilidade de um sistema (CS) e a eficácia operacional (EO) estão relacionados, a fim de que se tenha sucesso no controle do incêndio. Neste

caso, a independência, a dependência e a condicionalidade dos eventos estão incorporadas no DU da Figura 41.

Figura 41– Diagrama único de incêndio estabelecido

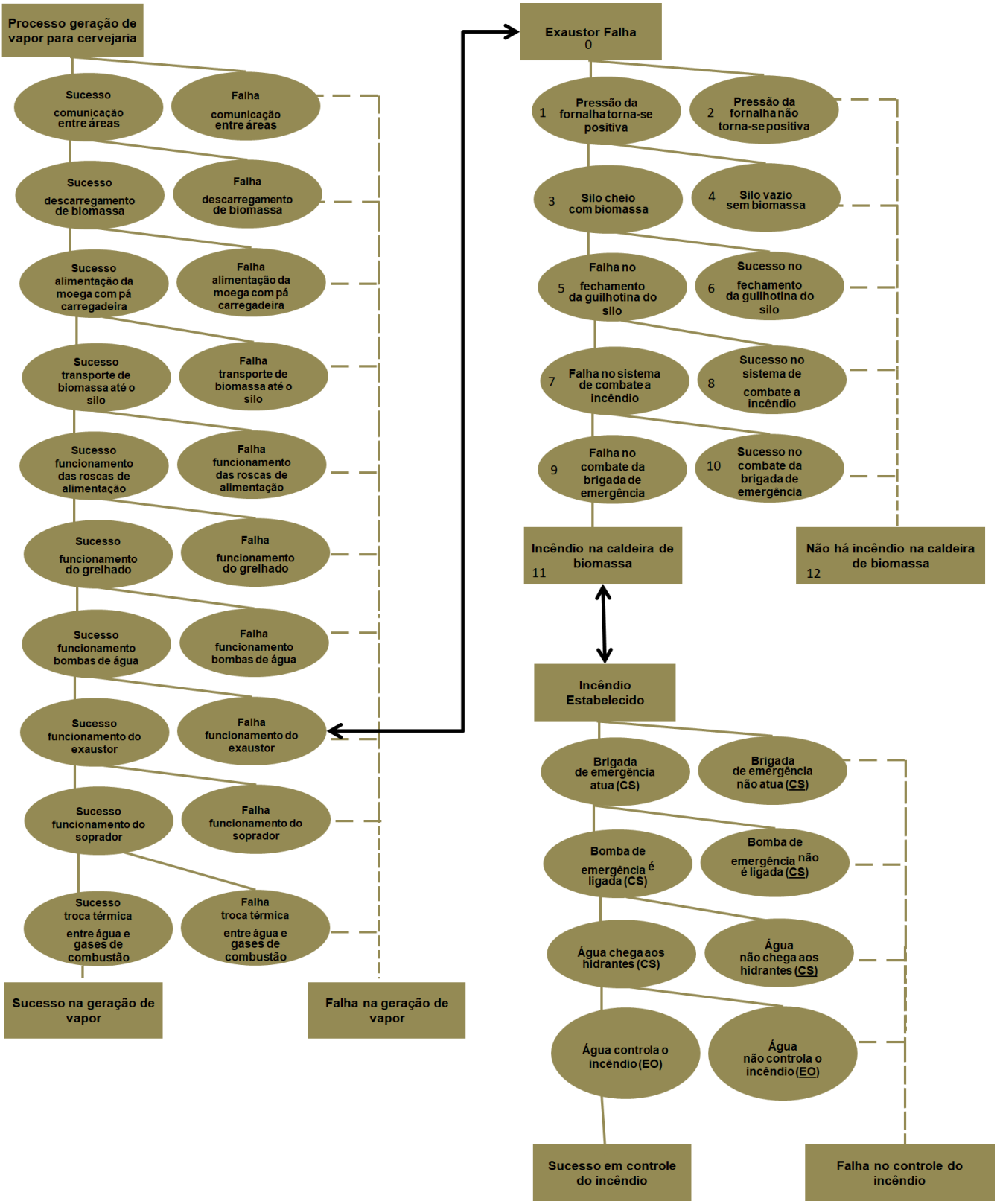


Fonte: Autor

Neste exemplo, a confiabilidade do sistema (CS) é avaliada através da atuação da brigada, da bomba de emergência e da chegada de água aos hidrantes. Entretanto, mesmo que o sistema seja confiável, não significa que o incêndio será controlado, já que depende do tamanho do mesmo. Ou seja, a confiabilidade é avaliada para todo o sistema, enquanto a eficácia operacional é avaliada para cada tamanho de fogo selecionado para análise.

Ainda sendo uma das vantagens dos diagramas únicos e contínuos a possibilidade de conectar análises entre si, é possível associar o DC da Figura 36 com os DU das Figura 40 e Figura 41. Essa flexibilidade permite uma tranquila transição entre análises macro e micro de sistemas, como podemos observar na Figura 42.

Figura 42– Combinação de diagramas únicos e contíuos



Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

Durante o presente estudo foi utilizado os diagramas únicos e contínuos propostos por Fitzgerald para a identificação dos perigos provenientes da geração de vapor em caldeiras de biomassa. Dentre todas as áreas e equipamentos da cervejaria em estudo, aplicamos o método do AHP proposto por Saaty para definir a área e o equipamento crítico da cervejaria. Obtivemos através desta ferramenta de avaliação multicritério que a caldeira é o equipamento mais crítico da cervejaria, onde a partir disto aplicamos os diagramas lógicos para a identificação dos perigos envolvidos neste equipamento.

Depois de aplicado os DU e DC no processo de geração de vapor da caldeira, foi possível visualizar a sequência de como as falhas acontecem no tempo e o que pode dar errado caso elas aconteçam. O mesmo, porém, não foi possível quando aplicamos a AF para este mesmo processo, já que este tipo de método de identificação do perigo não permite a visualização das falhas no tempo, além de não desenvolver o que pode dar errado caso as falhas ocorram.

Outro ponto positivo da aplicação dos diagramas lógicos foi permitir uma tranquila transição e análise entre sistemas macro e micro na geração de vapor em caldeiras de forma clara e organizada.

A metodologia aplicada neste estudo pode ser aplicada para qualquer processo de identificação do perigo em um sistema, o que constitui o primeiro passo de um sistema de gerenciamento do risco. A partir da identificação do risco utilizando os diagramas lógicos, deve-se avançar para os próximos passos do gerenciamento do risco, entretanto este estudo foi proposto desde o início à apenas identificar os riscos envolvidos em caldeira dentro do contexto de uma cervejaria. Porém, este estudo poderá servir de base para dar continuidade no estudo do gerenciamento de riscos em caldeiras no futuro.

REFERÊNCIAS

ALBERTON, Anete. **Uma Metodologia para Auxiliar no Gerenciamento de Riscos e na Seleção de Alternativas de Investimentos em Segurança**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1996.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY – CCPS. **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis.** 2. ed. John Wiley & Sons, 2010.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY – CCPS. **Guidelines for Initiating events and Independent protection Layers in layer of Protection Analysis.** John Wiley & Sons, p.34-56, 2015.

DHILLON, Balbir S. A common cause failure availability model. **Microeletronics Reliability,** v.17, n. 6, p.583-584, 1978.

DOWELL, A. M. Is it really na independente protection layer?. **Process Safety Progress,** v. 30, n.2, p. 126-131, 2011.

DUARTE, Dayse. A performance overvier about fire risk management in the Brazilian hydroelectric generating plants and transmission network. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries,** v. 17, n.1, p.65-75, 2004.

DUARTE, Dayse; PIRES, Thiago. Hazard identification using new logic diagrams and descriptors. **Process Safety Progress**, v.20, n.2, p.157-167, 2001.

FILHO, G. B. **Dicionário de Termos de manutenção, confiabilidade e qualidade.** Edição MERCOSUL. Português/Espanhol. ABRAMAN. Editora: Ciência Moderna, 2004.

FITZGERALD, Robert W. **Building fire performance analysis.** John Wiley & Sons, 2004.

FREITAS, C. M. & GOMEZ, C. M. Análise de riscos tecnológicos na perspectiva das ciências sociais. **História, Ciências, Saúde** - Manguinhos, 3: 485-504, 1997.

GRUHN, Paul; CHEDDIE, Harry L. **Safety Instrumented Systems: Design, Analysis and Justification**. 2nd ed. Durham: ISA – Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

HAMMARBERG, J.; NADJM-TEHRANI, S.. **Development of Safety-Critical Reconfigurable Hardware with Esterel**. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, v. 80, 2003.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61511-3: Functional safety – **Safety instrumented systems for the process industry sector** – Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels. 1st ed. Genebra: IEC, 2003.

LEES, Frank. **Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control.** 3. ed. Butterworth-Heinemann, 2004.

RAUSAND, Marvin; HOYLAN, Arnljot. **System reliability theory: models, statistical methods, and applications.** John Wiley & Sons, 2004.

ROCHA, N. R.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido – Manual Prático**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005b. 87 p.

Revista Proteção. (2007). Proteção, 63-67.

YORK TRAINING AND DEVELOPMENT (2007) – DK. PAC 193 – **Liquid Chilling Unit – Principle**.

W. BOLTON (2011) Programmable Logic Controllers. p. 14.