



Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia de Produção

**PROTOTIPAGEM DE BENS FÍSICOS COM USO DE MANUFATURA ADITIVA NO  
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS: Aprimorando a resiliência por meio da  
abordagem de Safety II**

**Brasília, 2024**

**Ana Beatriz Prugger do Amaral**

**PROTOTIPAGEM DE BENS FÍSICOS COM USO DE MANUFATURA ADITIVA NO  
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS: Aprimorando a resiliência por meio da  
abordagem de Safety II**

Monografia apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Produção pela Faculdade de  
Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB).

Orientadora: Professora Andrea Cristina dos  
Santos

**Brasília, 2024**

**Ana Beatriz Prugger do Amaral**

**PROTOTIPAGEM DE BENS FÍSICOS COM USO DE MANUFATURA ADITIVA NO  
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS: Aprimorando a resiliência por meio da  
abordagem de Safety II**

Monografia apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Produção pela Faculdade de  
Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB).

Orientadora: Professora Andrea Cristina dos  
Santos

**Brasília, 06 de setembro de 2024**

**BANCA AVALIADORA**

---

**Professora Andrea Cristina dos Santos**

---

**Professor Rafael Ernesto Kieckbusch**

---

**Professor Paulo Celso dos Reis Gomes**

## RESUMO

Este trabalho explora a aplicação da teoria da complexidade nas organizações contemporâneas, com foco na interdependência dos sistemas. Tradicionalmente, as análises de acidentes baseavam-se na identificação de causas e efeitos lineares, uma abordagem limitada quando aplicada a sistemas sócio-técnicos complexos, que envolvem grande variabilidade nas operações. Nesse contexto, o conceito de Safety II emerge com uma perspectiva proativa, visando aumentar a segurança ao garantir que o maior número possível de operações seja bem-sucedido, mesmo em condições adversas. O estudo aplica o Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM) no Laboratório Aberto de Brasília (LAB), um espaço colaborativo dedicado ao desenvolvimento de produtos. O objetivo é melhorar a resiliência das atividades de prototipagem, levando em consideração a complexidade e a variabilidade inerentes ao sistema. O FRAM permitiu uma análise detalhada dos pontos críticos do processo, identificando ajustes necessários para tornar o sistema mais resiliente às mudanças e aos desafios enfrentados no ambiente de inovação e desenvolvimento de produtos. Os resultados mostram que o FRAM é uma ferramenta eficaz para gerenciar a variabilidade e aumentar a resiliência operacional, tornando o sistema mais adaptável e robusto diante de incertezas.

**Palavras-chave:** Sistemas sócio-técnicos. FRAM. Safety I. Safety II. Engenharia de Resiliência. Prototipagem de bens físicos. Resiliência operacional. Manufatura aditiva.

---

## ABSTRACT

This paper explores the application of complexity theory in contemporary organizations, focusing on the interdependence of systems. Traditionally, accident analyses were based on identifying linear causes and effects, an approach limited when applied to complex socio-technical systems that involve significant variability in operations. In this context, the concept of Safety II emerges with a proactive perspective, aiming to enhance safety by ensuring that as many operations as possible are successful, even under adverse conditions. The study applies the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) at the Open Laboratory of Brasília (LAB), a collaborative space dedicated to product development. The goal is to improve the resilience of prototyping activities, taking into account the complexity and inherent variability of the system. FRAM allowed for a detailed analysis of critical process points, identifying necessary adjustments to make the system more resilient to changes and challenges faced in the innovation and product development environment. The results show that FRAM is an effective tool for managing variability and increasing operational resilience, making the system more adaptable and robust in the face of uncertainties.

**Key-words:** Socio-technical systems. FRAM. Safety I. Safety II. Resilience Engineering. Physical goods prototyping. Operational resilience. Additive manufacturing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 – 4 pilares da resiliência.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2 – Evolução dos métodos de modelagem de sistemas.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 3 – Unidade básica do FRAM.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 4 – Dimensões da fidelidade do protótipo.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 5 – Etapas da Manufatura Aditiva.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 6 – Fluxo de capacitação de novos membros no LAB.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 7 – Modelagem do FRAM para sistema de prototipagem.....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 8 – Função de diagnóstico do projeto.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 9 – Função de levantamento dos requisitos prévios.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 10 – Função de definição da equipe do projeto.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 11 – Função de definição do cronograma do projeto.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 12 – Função de seleção de materiais para impressão.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 13 – Função de desenvolvimento de mock ups.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 14 – Função de modelagem do protótipo.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 15 – Função de validação do modelo tecnicamente .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 16 – Função de realização do controle de qualidade.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 17 – Função de fabricação do protótipo.....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 18 – Função de validação do protótipo.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 19 – Função de definição dos próximos passos.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 20 – Função de capacitação de membros.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 21 – Função de fornecimento de energia elétrica.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 22 – Função de manutenção dos equipamentos.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 23 – Blueprint do pré-serviço.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 24 – Blueprint do serviço.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 25 – Blueprint do pós-serviço.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 26 – Análise da função de levantamento de requisitos em detalhe.....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Características de sistemas complexos.....</b>	<b>14</b>
<b>Tipo de função no modelo FRAM.....</b>	<b>27</b>
<b>Questionário para entrevistas.....</b>	<b>36</b>
<b>Quadro-Resumo de propostas de melhoria.....</b>	<b>58</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>ABNT</b>	<b>Associação Brasileira de Normas Técnicas</b>
<b>UnB</b>	<b>Universidade de Brasília</b>
<b>SST</b>	<b>Sistemas Sócio-Técnicos</b>
<b>FRAM</b>	<b>Método de Análise de Ressonância Funcional</b>
<b>DfRP</b>	<b>Design para Performance Resiliente</b>
<b>RE</b>	<b>Engenharia de Resiliência</b>
<b>WAI</b>	<b>Work-as-Imagined (Trabalho Imaginado)</b>
<b>WAD</b>	<b>Work-as-Done (Trabalho Realizado)</b>
<b>AcciMap</b>	<b>Mapeamento de Acidentes</b>
<b>STAMP</b>	<b>Modelo Sistêmico de Acidentes e Processos</b>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
1.1. OBJETIVOS	11
1.1.1. Objetivo Geral	11
1.1.2. Objetivos Específicos	11
1.2. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	11
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>12</b>
2.1. Sistemas Complexos	12
2.2. Safety I E Safety II	14
2.2.1. Relação blunt end - sharp end	16
2.3. Engenharia de resiliência	17
2.4. WAI x WAD	21
2.5. Modelagem de Sistemas	23
2.5.1. AcciMap	24
2.5.2. STAMP	24
2.5.3. Método De Análise De Ressonância Funcional - FRAM	25
2.5.3.1. Tipos de funções	27
2.5.3.2. Relação entre funções	27
2.5.3.3. Desenvolvimento do FRAM	28
2.6. Gestão de desenvolvimento de produto	30
2.7. Prototipagem	31
2.8. Manufatura aditiva	32
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>33</b>
3.1. Questionário	35
3.2. Entrevistas	37
<b>4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA</b>	<b>38</b>
4.1. Entrevistas	38
4.2. Modelagem do sistema	41
4.3. Proposição de melhorias	51
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO A – TRANSCRIÇÃO DA ENTREVISTA 1</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO B – TRANSCRIÇÃO DA ENTREVISTA 2</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO C – TRANSCRIÇÃO DA ENTREVISTA 3</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO D – TRANSCRIÇÃO DA ENTREVISTA 4</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO E – RELATÓRIO DO FRAM</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>68</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da civilização, novas tecnologias surgiram, mas, à época, os envolvidos não conseguiam prever seus efeitos de segunda ordem (Skyttner, 1996). Os problemas que emergiram não eram mais capazes de serem supridos pela ciência clássica e os resultados obtidos a partir dos sistemas fechados, eram mais distantes do que acontecia na prática (Alves, 2006). Apesar dessa noção de alguns sistemas sociotécnicos (SSTs) serem complexos não ser nova (Perrow, 1984), as organizações contemporâneas incorporaram algumas características da teoria da complexidade para uma ampla gama de sistemas, como o aumento da sua interdependência (ElMaraghy et al., 2012). Como as tecnologias da informação e comunicação são vastamente usadas na indústria, a maioria dos sistemas industriais apresentam com mais frequência aspectos típicos de sistemas sócio-técnicos complexos, sendo difícil encontrar um sistema puramente técnico nos sistemas industriais modernos (Perrow, 1999). Ainda, os princípios para o design de SSTs, assim como aqueles associados à complexidade são contingentes, ou seja, é necessário saber em quais circunstâncias é provável que possuam sua performance aumentada (Clegg, 2000). Nesse sentido, dois conceitos são propostos sobre a temática: a) complexidade como uma medida quantitativa, que convencionou a noção que alguns sistemas são mais complexos que outros; b) complexidade como um fenômeno emergente (Walker et al., 2010).

Nesse espectro, a visão tradicional de segurança como “condição em que nada dá errado ou onde o número de coisas que dão errado é aceitavelmente pequeno” não condiz com as características dos sistemas complexos, já que sua utilidade está limitada na identificação e controle de perigos (Conant e Ross, 1970). Alinhados com essa definição, a maioria das análises de acidentes ou métodos de avaliação de riscos estavam focados nos resultados fracassados (acidentes e incidentes), com o objetivo de localizá-los e tratá-los (Hollnagel, 2016), mas também individualizar as relações de causa-efeito entre eventos. A visão tradicional, abordada neste trabalho como Safety I, é limitada ao tratar de STSs ou que tenham aspectos de complexidade (Patterson e Deutsch, 2015). Dessa forma, a Safety II emergiu como um novo conceito de segurança baseado na motivação (Hollnagel, 2014) e a engenharia de resiliência como uma disciplina prática que busca proativamente gerenciar a sinergia de sistemas por meio de uma integração entre esses conceitos (Patriarca et al., 2018). Destarte, Safety II fornece uma perspectiva diferente para questionar a forma como o trabalho feito é entendido, sendo Safety I, um subconjunto da Safety II (Hollnagel, 2014).

Baseado nesses pontos, para analisar os riscos de maneira acurada, é necessário seguir uma perspectiva sistêmica, em linha com Safety II e a Engenharia de Resiliência de maneira a compreender (Riccardo et al., 2018) efeitos não-lineares da variabilidade entre agentes nas operações cotidianas. Assim, é possível focar não apenas em erros individuais, mas também sistêmicos, além de considerar os desvios que podem ocorrer entre o trabalho imaginado (work-as-imagined) e o trabalho realizados (work-as-done). Nesse sentido, o Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM) segue essa perspectiva operacional, reconhecendo o papel da variabilidade e performance e complexidade inerente. Ainda, o FRAM pode ter uma maior variedade de requisitos devido à sua capacidade de modelar melhor o ambiente que está sendo investigado e, portanto, sua regulamentação (Conant e Ross, 1970).

O trabalho propõe a aplicação do método de análise de ressonância funcional (FRAM) no sistema de prototipagem e bens físicos do Laboratório Aberto de Brasília a fim de aumentar a resiliência do sistema, aumentando a qualidade, produtividade, segurança e confiabilidade. O Laboratório Aberto de Brasília (LAB) é um ambiente colaborativo de aprendizagem ativa e multidisciplinar dedicado ao desenvolvimento de produtos, serviços e negócios. Através do compartilhamento de experiências e da resolução de desafios tecnológicos, o LAB encoraja os usuários a serem protagonistas do seu próprio processo de aprendizagem. Assim, o problema que este trabalho pretende resolver é o aumento da resiliência do sistema de prototipagem e bens físicos no Laboratório Aberto de Brasília (LAB). Isso visa melhorar a qualidade, produtividade, segurança e confiabilidade dentro desse ambiente colaborativo de aprendizagem ativa e multidisciplinar.

Visando potencializar o ecossistema de empreendedorismo e inovação de Brasília, o LAB oferece acesso à infraestrutura, suporte e capacitação, facilitando a transformação de ideias em protótipos. Instituído com objetivos claros, o LAB atua como um agente de promoção das metodologias ativas no ensino, incentivando uma integração entre a teoria e a prática nas disciplinas de engenharia e projetos universitários. Além disso, busca formar profissionais com habilidades em fabricação digital e presta serviços à comunidade para o desenvolvimento de protótipos utilizando essas tecnologias.

A estrutura das atividades de prototipagem no LAB, independentemente do tamanho dos laboratórios visitados, é organizada em três áreas básicas: bancada de marcenaria, bancada de eletrônica e espaço para manufatura aditiva, geralmente centrado em impressoras 3D. Os serviços centrais oferecidos pelo LAB são: desenvolvimento de protótipos, acesso à infraestrutura laboratorial e capacitação. O desenvolvimento de protótipos no LAB consiste

em projetar, modelar, fabricar e realizar o acabamento de um protótipo, sendo ideal para clientes que necessitam de assistência técnica em todas ou algumas dessas etapas. (Zimmerman, 2018).

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é aprimorar a resiliência de um sistema sociotécnico complexo na fase de prototipagem de bens físicos com uso de manufatura aditiva no desenvolvimento de produtos do Laboratório Aberto de Brasília (LAB), com o uso da abordagem do Safety II.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

O trabalho visou atingir os seguintes objetivos específicos para, no fim, alcançar o objetivo principal:

- A. Conceituar as características de um sistema complexo, as divergências entre Safety I e II em conjunto com a Engenharia de Resiliência;
- B. Comparar ferramentas e métodos de modelagem de sistemas complexos;
- C. Aplicar a sistematização do FRAM em um estudo de caso único da prototipagem do LAB;
- D. Propor melhorias no sistema com base na Engenharia de Resiliência para aumentar o desempenho do sistema.

## 1.2. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Para cumprir com os objetivos propostos anteriormente, o trabalho está dividido da seguinte forma:

- Capítulo 1: introdução ao trabalho, com a explanação dos aspectos gerais do estudo e seus objetivos;
- Capítulo 2: referencial teórico, com a definição dos principais conceitos que serão relevantes para a construção do estudo e que serão aplicados nos capítulos seguintes;

- Capítulo 3: apresentação da metodologia de pesquisa conforme modelo proposto e sua classificação científica;
- Capítulo 4: aplicação da metodologia em um estudo de caso com proposição de melhorias no sistema considerando aspectos de Safety I e II com base no modelo;
- Capítulo 5: considerações finais sobre o tema e a metodologia aplicadas no estudo de caso, como também propostas para futuros trabalhos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A estrutura conceitual-teórica é a primeira parte do estudo de caso, mapeando o conteúdo do tema e delimitando as fronteiras do trabalho. Para a pesquisa, realizou-se buscas nas plataformas Web of Science, Google Scholar e Scopus para identificação e seleção dos autores mais relevantes na literatura sobre os temas deste referencial, além das obras mais cruciais para a temática.

O capítulo será segmentado em blocos em que se buscará conceituar um sistema complexo, seguido dos seus impactos na engenharia de segurança, com as diferenças de Safety I e Safety II. Além disso, buscará aprofundar o Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM) e, por fim, definir conceitos-chave relacionados ao desenvolvimento de produtos como prototipagem e manufatura aditiva.

### 2.1. Sistemas Complexos

Na segunda metade do século XX, a sociedade foi marcada por diversas transformações com o aprimoramento da tecnologia e desenvolvimento de invenções de grande escala, como bombas nucleares e a introdução de computadores para o público em geral. Além disso, a população começava a enfrentar reflexos da globalização, como o forte crescimento urbano, que ocasionava tráfegos nos principais centros. Com esses feitos, João Bosco da Mota Alves explica que as ciências clássicas desenvolveram uma tecnologia aparentemente programada para gerar o caos na humanidade.

Skyttner (1996) afirma que à época, foram incapazes de prever os efeitos colaterais de segunda ordem, com o foco apenas em resolver suas necessidades de primeira ordem. Como exemplo, o *American Way of Life*, que surgiu com força total após a 1ª guerra, impulsionou um consumismo desenfreado que, até hoje, gera reflexos no país, como acúmulo de lixo e destruição ambiental para atender essa demanda exagerada de produtos. Caso o restante da

população replicasse esse comportamento, seria necessário 5 Planetas Terra para suprir essa demanda.

Esse é apenas um exemplo da dificuldade dos problemas que começaram a se desenvolver a partir daquela época. Nesse sentido, a ciência clássica se mostrava cada vez mais incapaz de suprir as necessidades para resolver esses problemas. A estratégia usada era a da compartimentalização de etapas, com aplicação de modelos teóricos e que consideravam sistemas fechados. Contudo, o resultado obtido em cada uma das etapas se distanciava do resultado obtido no todo. O *Clockwork Universe* de Newton afirmava que grandes problemas poderiam ser decompostos em problemas menores e que estes poderiam ser resolvidos por dedução racional. Essa visão foi propagada até nas práticas da área da saúde em que o coração era visualizado como uma bomba e se perpetuava, igualmente, nas práticas gerenciais.

Esses sistemas independente do seu nível de complexidade compartilham de duas características em comum: a) possui uma coleção de componentes ou elementos; b) conjunto de relações entre seus componentes. Ademais, em sua primeira classificação, os sistemas podem ser segmentados em teleológicos e emergentes. Os sistemas teleológicos são desenvolvidos com um objetivo-fim e tem um planejamento para alcançá-los. Esses sistemas são guiados por fatores não apenas mecânicos, mas também procurando a auto-realização. Já os sistemas emergentes ocorrem de forma mais natural num aspecto bottom-up.

Assim, dois conceitos são propostos sobre a temática: a) complexidade como uma medida quantitativa, que convencionou a noção que alguns sistemas são mais complexos que outros; b) complexidade como um fenômeno emergente (Walker et al., 2010). Nesse contexto, a complexidade dos sistemas apoiam-se nesse conceito de emergência, considerando que a interação espontânea entre sistemas frequentemente deriva de propriedades que não são tão fáceis de prever. Sendo assim, a única maneira de compreender como será o comportamento de um sistema complexo é por meio da observação. Contudo, apesar de existir essa falta de previsibilidade, é possível em grande parte dos casos fazer afirmações e encontrar padrões gerais acerca do comportamento de um sistema complexo.

As diferenças entre os sistemas podem ser compreendidas de diferentes formas, com foco na estrutura dos sistemas ou até na extensão de seu escopo. Como a preocupação principal é gerenciar esses sistemas complexos, o escopo refere-se às suas características funcionais ao invés de físicas. Para eles, o ambiente não pode ser completamente especificado e descrito, além de não conseguirem ser constantes (Hollnagel, 2014). Dessa forma, é

possível compreender as características dos sistemas complexos no que tange a alguns aspectos.

Tabela 1: Características de sistemas complexos

	<b>Sistemas Complexos</b>
<b>Quantidade de detalhes</b>	Descrições elaboradas e com muitos detalhes
<b>Nível de compreensão</b>	Os princípios de funcionamento são parcialmente desconhecidos
<b>Estabilidade</b>	Sistema muda antes da descrição
<b>Relação com outros sistemas</b>	Interdependência
<b>Grau de controle</b>	Baixo - difícil de controlar

Fonte: Adaptado de Hollnagel, 2014

## 2.2. Safety I E Safety II

Assim como os sistemas, o conceito de segurança também evoluiu ao longo do tempo e conforme a complexidade do sistema. Na forma tradicional, é definida como a condição onde nada dá errado ou onde o número de coisas que dão errado é aceitavelmente baixo (Hollnagel et al, 2012). Nesse espectro, a maioria dos acidentes e/ou métodos de avaliação de risco focaram no resultado negativo do trabalho, ou seja, acidentes ou incidentes. O principal objetivo desse modelo é localizar ou antecipar as causas do acidente e corrigi-las (Hollnagel et al, 2016). Sendo assim, essa abordagem “localizar e corrigir” pode ser classificada como reativa, já que depende de um acidente para que se concretize (Underwood e Waterson, 2014).

Esse conceito tradicional é classificado como Safety I e é particularmente útil para sistemas que possuem elementos majoritariamente técnicos (Paterson e Deutsch, 2015). Esse conceito se baseia nos seguintes aspectos (EUROCONTROL, 2009):

- Sistemas são possíveis de serem decompostos e bem compreendidos;
- Sistemas e locais de trabalho são bem desenhados e mantidos de maneira correta;
- Procedimentos são compreendidos, completos e corretos;
- Funcionários se comportam da maneira esperada e da forma que foram treinados;
- Designers previram todas as contingências e já ajustaram o sistema com a capacidade de resposta adequada.

Ainda, o conceito de Safety I se baseia em algumas premissas para ser aplicados (EUROCONTROL, 2013)

- Todos os acidentes são causados pelos componentes falhos de um sistema que estão quebrados ou não funcionam de forma adequada. Contudo, esses componentes funcionam conforme o esperado em situações de não-acidente; ou seja, resultados de trabalho falhos e bem-sucedidos possuem causas e processos diferentes;
- Todos os acidentes possuem uma causa-raíz;
- Para um acidente, se a informação e evidência fornecidas são suficientes, é possível, por meio de análises, designar um conjunto razoável de causas que se relacionam direta ou indiretamente com o acidente;
- Se um conjunto de causas referente a um acidente puder ser eliminado ou substituído, o mesmo acidente ou similares não voltam a acontecer.

Devido à variedade restrita de requisitos, sua eficácia é limitada na identificação e controle de perigos (Conant and Ross, 1970). Ainda, o uso dessa relação causal linear para descrever os perigos gera um foco nos resultados negativos e baixos níveis de controle, o que limita o aprendizado e engajamento multidisciplinares (Cox, 2008). Além disso, considerando o conceito de sistemas complexos e as premissas associadas à Safety I, é impossível prever todos os casos passíveis de acidentes principalmente em SSTs (Ham, 2021), sendo eles limitados para atuar nesses sistemas (Paterson e Deutsch, 2015).

Dessarte, o Safety II emergiu como um novo conceito de segurança baseado nessa motivação (Hollnagel, 2014). Essa perspectiva permite focar não apenas nas falhas individuais, mas também em falhas sistêmicas, reconhecendo que acidentes podem ser resultados de um trabalho normal e em circunstâncias normais (Patriarca et al, 2018). O conceito pode ser definido como a condição onde a maior quantidade possível ocorre de maneira bem-sucedida, em que o número de resultados pretendidos e exitosos é o mais alto possível devido à capacidade de suceder sob condições esperadas e, igualmente, às situações inesperadas (Hollnagel, 2014). Nesse sentido, as premissas aplicadas para o Safety II são as seguintes (EUROCONTROL, 2009):

- Sistemas não podem ser decompostos de forma significativa;
- As funções de um sistema não são bimodais, mas a performance cotidiana é flexível e variável;

- A variabilidade da performance humana conduz o sucesso da mesma forma que ao fracasso do sistema;
- Mesmo que algumas consequências possam ser interpretadas como consequências lineares de outros eventos, algumas são resultado da variabilidade de performance acoplada.

Nesse sentido, Safety II foi caracterizado como um não-evento dinâmico; dinâmico na essência que é uma condição contínua do sistema, nas quais os problemas estão momentaneamente sob controle devido a compensações realizadas (Weick, 1987); e não-evento porque seus resultados bem-sucedidos não atraem atenção para si e, portanto, são constantes (Sutcliffe and Weick, 2013). Contudo, Hollnagel (2014) pontua que um não-evento não pode ser observado nem medido. Para ele, Safety II seria caracterizado como um evento dinâmico, já que é marcado pela presença de sucessos, não pela ausência de erros. Sendo assim, quanto mais operações bem sucedidas, mais seguro um sistema é e, como é mensurado por algo que de fato acontece (eventos de sucesso) pode ser mensurado e gerenciado. Ainda, para que isso seja possível, é um pré-requisito compreender como o sistema usualmente opera para identificar quando algo está potencialmente incorreto.

Como o Safety II sugere, uma forma mais eficiente de maximizar a segurança de um sistema corresponderia a uma abordagem proativa ou com um engajamento ativo, assegurando que o sistema que mantenha de forma bem-sucedida e resiliente (Hollnagel, 2014). Contudo, é importante ressaltar que o conceito surgiu para suplementar os gargalos do conceito tradicional, não substituí-lo. Apesar do Safety I e II se reduzirem a resultados indesejados, eles usam abordagens diferentes com consequências significativas sobre como o sistema é controlado e compreendido. Nesse sentido, é necessário discernir as situações onde a abordagem por Safety I é suficiente e eficiente daquelas que a abordagem por Safety II podem ser uma alternativa útil. Assim, é crucial considerar a situação problema para identificar a melhor abordagem para o caso concreto (Ham, 2021).

### 2.2.1. Relação *blunt end - sharp end*

Para entender melhor essa diferenciação e o surgimento da engenharia de resiliência, é necessário esclarecer a relação entre *blunt end - sharp end*. *Blunt end* representa os elementos do sistema que estão mais afastados da ação direta, mas influenciam a segurança por meio de decisões, políticas e alocação de recursos. É tradicionalmente considerada como o contexto que afeta a confiabilidade da performance humana e é endereçada como um segundo plano

organizacional fora do escopo de análise. De forma análoga, *sharp end* refere-se às pessoas que estão trabalhando no tempo e local onde atividades operacionais ocorrem e, portanto, acidentes podem ocorrer.

Nesse contexto, no paradigma de Safety I, ou seja, contagem de erros, investir em segurança compreendia a proteção do sistema contra componentes humanos não confiáveis, erráticos e limitados; ou seja, a proteção dos indivíduos da *blunt end* contra os erros dos indivíduos da *sharp end*. (Woods e Hollnagel, 2004). Entretanto, uma abordagem sistêmica deve considerar a forma que as condições gerenciais (*blunt end*) são administradas da mesma forma que o restante das atividades. (Macchi, 2010).

### 2.3. Engenharia de resiliência

Considerando o contexto do surgimento do conceito de Safety II, a engenharia de resiliência também emergiu como uma disciplina prática de segurança que busca proativamente gerir a segurança sistêmica por meio de uma integração sinérgica entre Safety I e Safety II (Patriarca et al, 2018). Dessa forma, é uma disciplina que foca em desenvolver os princípios e métodos práticos que são necessários para um sistema funcionar de maneira resiliente (Hollnagel et al, 2006). Ela foi desenvolvida para endereçar as novas preocupações de segurança que emergiram com o aumento do uso de SSTs, onde a performance depende de funções técnicas e sociais, com fortes interações com fatores humanos, teoria do controle e engenharia de segurança. (Hollnagel et al, 2010)

A resiliência existe em torno de 4 conceitos básicos (Woods, 2015): i - resiliência como retorno ao equilíbrio após um trauma, ou seja, a capacidade do sistema voltar ao seu funcionamento padrão após uma alteração abrupta em seu funcionamento; ii - resiliência como sinônimo de robustez, na medida que ao aumentá-la, também amplia o conjunto de perturbações às quais o sistema pode responder de maneira eficaz; iii - resiliência como oposto de fragilidade e descreve o quão rapidamente o desempenho de um sistema declina quando ele se aproxima e atinge seu limite em comparação com seu funcionamento padrão; e iv - resiliência como arquiteturas de rede que podem sustentar a capacidade de se adaptar a surpresas futuras à medida que as condições evoluem, ou seja, ela precisa estar equipada nas etapas iniciais com os meios para se adaptar ou ser adaptável quando enfrentar mudanças e desafios previsíveis ao longo de seu ciclo de vida.

Embora a maioria dos SSTs possua algum grau de resiliência projetada, isso muitas vezes é uma consequência não intencional de decisões relacionadas às dimensões tradicionais de desempenho, como qualidade, produtividade, confiabilidade e segurança (Hollnagel, 2020). Nesse sentido, diz-se que um sistema é resiliente se ele consegue ajustar seu funcionamento antes, durante ou após um perturbação ou mudança e, ainda assim, operar sob as condições esperadas e inesperadas (Hollnagel, 2016). Sendo assim, não limita as descrições de eventos às causas, como na abordagem clássica e nem seu aprendizado a categorias específicas de eventos. Assim, em um sistema dito resiliente, o aprendizado deve ser contínuo e orientado por um plano ou estratégia, além de contemplarem diversos horizontes temporais, já que as lições a serem aprendidas com mudanças de curto prazo não são as mesmas que as lições a serem aprendidas com tendências de longo prazo. A capacidade de ajustar após mudanças e perturbações significa que as experiências de eventos passados são usadas para tomar decisões sobre mudanças estruturais ou funcionais para que o sistema esteja melhor preparado para o que pode acontecer no futuro. Essas mudanças geralmente estão focadas nas causas, conforme determinado por investigações de acidentes, embora essas causas e explicações sempre devam ser vistas em relação aos modelos de acidentes e aos métodos de investigação que foram utilizados (Hollnagel, 2004 e 2008a).

Dessa forma, se resume na habilidade de um sistema em atingir seus propósitos funcionais e se adaptar para condições de trabalho adversas e proativamente suprimir os riscos do sistema (Anderson et al, 2016). É baseado nas seguintes premissas (EUROCONTROL, 2009):

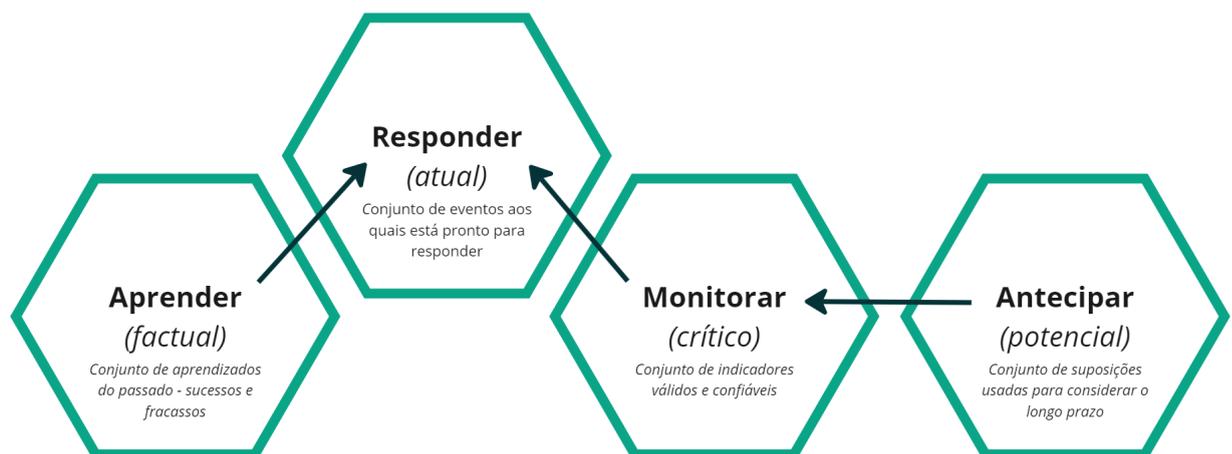
1. As condições de desempenho são sempre sub especificadas. Indivíduos e organizações devem, portanto, ajustar o que fazem a fim de atender às demandas e recursos atuais. Como esses são finitos, geram ajustes inevitavelmente aproximados;
2. Alguns eventos adversos podem ser atribuídos a um problema ou mau funcionamento de componentes e funções normais do sistema, mas outros não podem. Estes podem ser melhor entendidos como o resultado de acontecimentos inesperados fruto de combinações de variabilidade de desempenho;
3. A gestão da segurança não deve basear-se apenas em entender eventos após seu acontecimento, nem confiar exclusivamente na tabulação de erros e no cálculo de probabilidades de falha. Nesse sentido, deve ser, além de reativo, proativo;

4. A segurança não pode ser isolada do *core business* do processo e vice-versa. Ela e a produtividade são pré-requisitos mútuos entre si. A segurança deve, portanto, ser alcançada através de melhorias e não de restrições. Adotar esta visão cria a necessidade de uma abordagem que pode representar a variabilidade do desempenho normal do sistema e para métodos que podem usar isso para fornecer explicações mais abrangentes sobre acidentes, assim como identificar riscos potenciais.

Outrossim, existem 4 pilares da resiliência que representam uma capacidade essencial que o sistema deve possuir, são eles:

1. Lidar com o atual: saber como responder a interrupções e perturbações regulares e irregulares ajustando o funcionamento normal;
2. Lidar com o crítico: saber como monitorar aquilo que é ou pode vir a ser uma ameaça para o sistema e deve abranger tanto o próprio sistema quanto o ambiente no qual ele está imerso;
3. Lidar com o factual: saber as experiências e os aprendizados do passado;
4. Lidar com o potencial: saber antecipar desenvolvimentos e ameaças do futuro e suas eventuais consequências para o sistema;

Figura 1: 4 pilares da resiliência



Fonte: Adaptado de Hollnagel, 2009

Para lidar com o atual, é preciso saber para quais eventos o sistema está pronto para responder e, portanto, essas definições devem ser construídas, verificadas e mantidas. Caso isso não seja feito, pode haver um desperdício de esforços ou uma incapacidade de responder

a eventos críticos. Nesse sentido, o sistema deve estar apto para mudar para um estado de prontidão antes que algo aconteça, isso significa que recursos são alocados para corresponder às necessidades do evento esperado, que funções especiais são ativadas e que as defesas são aumentadas. Ademais, esse estado de prontidão não deve ser prolongado por tempo além do que o necessário, pois pode consumir recursos em excesso que poderiam ser usados para a manutenção do funcionamento padrão.

Além disso, no que diz respeito à habilidade de lidar com o atual, Westrum (2006a) propôs uma caracterização das ameaças em termos de sua previsibilidade, seu potencial para perturbar o sistema e sua origem (interna vs. externa). Ele propôs ainda fazer uma distinção entre três tipos de ameaças:

1. Regulares: ocorrem com tanta frequência que é possível e viável desenvolver uma melhor prática para tratá-la e reservar recursos para tais situações;
2. Irregulares (eventos únicos): impossibilidade de fornecer uma resposta padrão e o alocamento de recursos para este fim é proibitivo devido a sua grande quantidade de eventos;
3. Sem precedentes: ocorrem de maneira inesperada e leva o sistema para fora de sua experiência adquirida, sendo impraticável considerar uma resposta preparada, embora seja necessário reconhecer sua possível existência

Por outro lado, para lidar com o crítico, é essencial possuir indicadores válidos e verossímeis, sendo que a melhor solução é baseá-los em um modelo articulado dos processos críticos do sistema. Contudo, essa opção é viável apenas em sistemas tecnológicos puros não sendo, portanto, aplicável em SSTs. Nesse sentido, a solução mais aplicada é a escolha de indicadores que correspondam a uma tradição dentro de uma organização ou campo de atividade, devendo evitar a escolha de um indicador apenas por parecer ser um consenso em outras organizações. Após essa definição, é necessário estipular quais os critérios devem ser utilizados para a revisão e a periodicidade que ela deverá acontecer, devendo ser claros e se referirem a mudanças estáveis, de preferência.

Ainda, ao lidar com o potencial, é importante determinar quais suposições serão usadas para considerar os desenvolvimentos de longo prazo, sendo que uma suposição realista é a de que "o que pode potencialmente acontecer será um fenômeno emergente em vez de um resultado, porque os sistemas com os quais lidamos são apenas "quase decomponíveis" (Simon, 1962), ou seja, todos os componentes têm, a princípio, uma relação direta ou indireta entre si.

Por último, ao olhar o factual, é importante aprender com os sucessos e fracassos do passado, em particular para aprender as lições certas com a experiência certa, sendo que não deve ater-se apenas aos quase-acidentes ou recuperações espontâneas.

Ademais, o conceito de performance resiliente ainda é emergente em parte decorrente da auto organização de pessoas que preenchem lacunas no design do sistema de trabalho e em parte de recursos concebidos antecipadamente (Wachs et al., 2016). Contudo, isso não exclui o design do sistema de trabalho antecipadamente, com a intenção deliberada de influenciar o desempenho resiliente (Disconzi e Saurin, 2022). Nesse sentido, o conceito de Design para Desempenho Resiliente (DfRP) foi definido, assim como seus sete princípios, a saber: (i) deve haver modelos funcionais do sistema; (ii) tornar as variações no desempenho visíveis; (iii) utilizar o tipo de padronização que melhor se adapte à natureza da função; (iv) projetar recursos e estratégias de folga; (v) projetar para desempenho aceitável mesmo em condições degradadas; (vi) o design deve envolver a alavancagem de perspectivas diversas; e (vii) projetar para apoiar a aprendizagem contínua no nível individual e organizacional. O uso do DfRP pode dar origem a práticas novas ou revisadas para a gestão da resiliência, que seriam elas mesmas resultados do Design Science Research (DSR), sendo necessária, uma vez que o conceito e os princípios do DfRP são apresentados em um nível elevado de abstração e, portanto, precisam ser traduzidos em práticas viáveis para pesquisadores e profissionais.

#### 2.4. *WAI x WAD*

*Work As Imagined* (WAI) vem de uma tradição estabelecida da Teoria da Administração Científica em decompor tarefas e atividades como o ponto inicial para aprimorar a eficiência laboral. Por esta análise, resultados adversos poderiam ser entendidos considerando os eventos anteriores como componentes e encontrando aqueles que falharam. De forma similar, a segurança poderia ser aprimorada por meio de um planejamento meticuloso combinado com instruções detalhadas e treinamento (Hollnagel, 2014)

Ainda, o *Work As Done* (WAD) trata da forma em que o trabalho é realizado efetivamente na prática pelo sistema. Nesse sentido, a segurança poderia ser alcançada garantindo que o WAI fosse idêntico ao WAD. Contudo, o WAI tende a enxergar a ação somente em função das tarefas que a compõem e não compreende a forma na qual o processo de realizar a tarefa é moldado pelas mudanças constantes no trabalho e no mundo (Hollnagel, 2014). Dessa forma, existe um *gap* entre WAI e WAD que precisa ser compreendido por 2 razões principais: a) ele normalmente indica que resultados bem-sucedidos não necessariamente ocorrem porque os indivíduos estão operando conforme o WAI; b) grandes

*gaps* sugerem um espaço considerável para melhoria (Perkins et al. 2010). Dessarte, só é possível especificar o WAI em situações que o sistema é compreendido em sua completude e situações onde ajustes são desnecessário. Entretanto, estes sistemas são minoria nos dias de onde, predominados por SSTs. Assim, quanto mais complexos os sistemas são, mais distintos serão o WAI e WAD (Hollnagel, 2014).

Ademais, os desvios entre os dois podem provocar tanto resultados positivos quanto negativos. Sendo assim, eles devem ser considerados de acordo com o conceito de racionalidade, pois em algumas circunstâncias tornam-se inevitáveis e até necessários para lidar com a complexidade do cenário atual (Riccardo et al, 2018). Considerando esses aspectos, é válido dizer que a variabilidade na performance é inevitável e necessária (Hollnagel, 2014), no nível do indivíduo e também no nível organizacional. Isso altera o significado do fator humano para segurança, tendo em vista que, historicamente, os recursos humanos eram considerados o grande gargalo operacional ou ainda uma ameaça à produtividade. Contudo, ao reconhecer a necessidade da variabilidade na performance, o indivíduo torna-se indispensável para a segurança do sistema. Mediante esse contexto, a análise dos acidentes deve considerar que (Hollnagel, 2014):

- Os sistemas não são perfeitos e as pessoas devem aprender a identificar e superar falhas de design e problemas funcionais;
- As pessoas são aptas a reconhecer as demandas reais e ajustar o seu desempenho de acordo com elas;
- Quando os procedimentos precisam ser aplicados, as pessoas podem interpretá-los e aplicá-los conforme as condições da situação;
- As pessoas podem detectar e corrigir quando algo dá errado ou está prestes a dar errado e, portanto, intervir antes que a situação se agrave.

Considerando estas premissas, é preferível descrever WAD em detrimento do WAI, já que os sistemas são geralmente muito confiáveis, mas o são porque as pessoas são flexíveis e capazes de se ajustar conforme o demandado, não porque o sistema foi cuidadosamente projetado (Hollnagel, 2014). Nesse sentido, Hollnagel (2014) afirma que falhas não podem ser prevenidas por meio da eliminação da variabilidade na performance, já que o sucesso também depende dela. Assim, não é possível prevenir acidentes impondo limitações na forma que o trabalho é realizado. A solução é, portanto, identificar as situações em que a variabilidade pode ser combinada para criar efeitos indesejados e monitorar o sistema de forma a atuar quando ele ameaça sair de controle. De forma semelhante, situações em que a

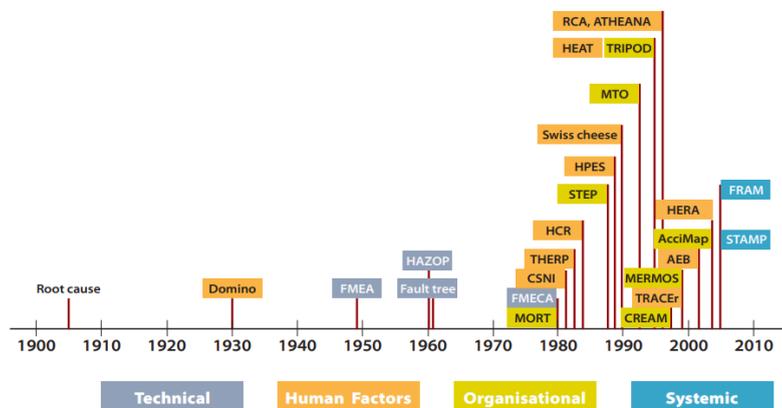
variabilidade possui um efeito positivo também devem ser levadas em consideração para serem reforçadas no curto prazo. Para que a tecnologia continue funcionando, indivíduos e organizações devem funcionar como um amortecedor entre o sistema e o ambiente, de forma a absorver o excesso de variabilidade quando é demais e acrescentá-la quando é de menos.

Vale ressaltar que conforme o autor, se os recursos fossem completamente adequados, esses ajustes de performance não seriam necessários, mas, como isso não acontece, os ajustes não podem ser perfeitos ou completos, mas devem permanecer aproximados a fim de suprir essa variação na variabilidade de performance.

## 2.5. Modelagem de Sistemas

Atualmente, diferentes modelos de para avaliar a causa de acidentes são usados, embora a maioria deles tenha sido criada há muito tempo. Com o aumento da complexidade de sistemas e as mudanças na indústria, pode gerar limitações na identificação das causas dos acidentes nos modelos mais tradicionais dentro da indústria moderna (Youssef et al., 2018). Com isso, novos modelos de acidentes baseados na teoria dos sistemas foram introduzidos, mas são predominantemente utilizados por pesquisadores acadêmicos. Entre os modelos sistêmicos de análise de acidentes, destacam-se o Modelo Teórico de Acidentes e Processos (STAMP), o Modelo de Acidentes por Ressonância Funcional (FRAM) e o método AcciMap, que são os mais citados na literatura. A figura abaixo demonstra a evolução dos modelos criados ao longo do tempo bem como sua abordagem: técnica, baseada em fatores humanos, organizacional ou sistêmica.

Figura 2: Evolução dos métodos de modelagem de sistemas



Fonte: Hollnagel, 2010

Embora os modelos sistêmicos de acidentes tenham uma base teórica semelhante, o desenvolvimento e a metodologia de cada um são diferentes e, conseqüentemente, as conclusões obtidas podem ser diferentes (Youssef et al., 2018).

#### 2.5.1. AcciMap

O método de análise de acidentes Accimap é fundamentado na estrutura de gestão de riscos desenvolvida por Rasmussen (Rasmussen, 1997). Um Accimap visualiza os elementos que contribuem para um acidente em um sistema complexo sócio-técnico e mapeia esses fatores nos diversos níveis do sistema, estabelecendo conexões entre causas e conseqüências tanto horizontalmente, quanto verticalmente. Assim sendo, o Accimap auxilia na identificação dos responsáveis pelas decisões relevantes e na compreensão do ambiente normal de trabalho no qual eles influenciam e potencialmente originam acidentes.

A modelagem de sistemas deve seguir uma abordagem de cima para baixo, baseada em conceitos de controle, ao invés de simplesmente agregar modelos de diferentes disciplinas. Ele acredita que os acidentes resultam da perda de controle em processos físicos, influenciados por decisões em todos os níveis hierárquicos. Assim, é crucial que decisões superiores fluam para baixo e informações operacionais subam na hierarquia, criando um sistema de feedback completo para garantir a segurança (Rasmussen, 1997).

Nesse sentido, o modelo possui uma abordagem mais organizacional e, portanto, não se mostra como uma ferramenta adequada para esta pesquisa tendo em vista que, embora seja útil para entender e mapear atividades e processos, é preciso utilizar uma abordagem que também considere fatores sociais, culturais e humanos de forma mais abrangente, considerando a complexidade de suas interações.

#### 2.5.2. STAMP

No STAMP, os sistemas são vistos como componentes inter-relacionados que permanecem em equilíbrio dinâmico por meio de ciclos de feedback de informação e controle. Acidentes em sistemas complexos não resultam apenas de falhas isoladas; ocorrem quando perturbações externas, falhas ou interações disfuncionais entre componentes não são bem geridas pelo sistema de controle. A segurança é tratada como um problema de controle e é gerida por uma estrutura de controle dentro de um sistema sociotécnico adaptativo. Em vez de se concentrar exclusivamente na prevenção de falhas de componentes, o STAMP adota conceitos como restrições, ciclos de controle, modelos de processo e níveis de controle. Na teoria dos sistemas, o controle está vinculado à imposição de restrições. Portanto, a causa de um acidente é interpretada como a falta de restrições adequadas no design e nas operações do sistema, com cada nível estabelecendo restrições para o nível inferior (Leveson, 2004).

Embora possua uma abordagem sistêmica, o STAMP é primariamente voltado para a análise de acidentes e falhas, sendo que o presente projeto necessita de uma análise mais ampla que aborde questões de design, interações sociais e culturais.

### 2.5.3. Método De Análise De Ressonância Funcional - FRAM

O Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM) é um método de modelagem de STSs baseado, como o próprio nome diz, na ressonância funcional que reflete a variabilidade de performance e sua propagação ao longo do sistema e pode ser efetivamente usado para investigação de acidentes e avaliação de risco conforme a perspectiva de Safety II, além de ter um maior variedade de requisitos devido a sua habilidade de modelar de forma melhor o ambiente sendo investigado e suas regulações (Conant and Ross, 1970). Dessa forma, mostra-se um ótimo modelo para descrever o WAD, analisar acidentes e avaliar os riscos com base no Safety II (Hollnagel, 2014), além de reforçar os 4 aspectos de resiliência do sistema (Hollnagel, 2006).

O FRAM é baseado em 4 princípios (Hollnagel, 2014):

1. Equivalência entre sucessos e fracassos: As falhas não representam um colapso ou mau funcionamento das funções normais do sistema, mas sim adaptações necessárias para lidar com a subespecificação encontrada em sistemas complexos do mundo real.
2. Princípio dos ajustes aproximados: Para realizar qualquer atividade, as pessoas devem ajustar sua performance para as condições vigentes. Como tempo e recursos são finitos, esses ajustes serão aproximados
3. Princípio da emergência: falha e a performance normal são um fenômeno emergente - nenhum pode ser atribuído ou explicado simplesmente pela referência ao funcionamento de componentes específicos
4. Princípio da ressonância funcional: Substituição da relação tradicional de causa e efeito pela ressonância, que explica como a variabilidade de um número de funções ocasionalmente pode ressoar, gerando variabilidade excessiva em uma ou mais funções

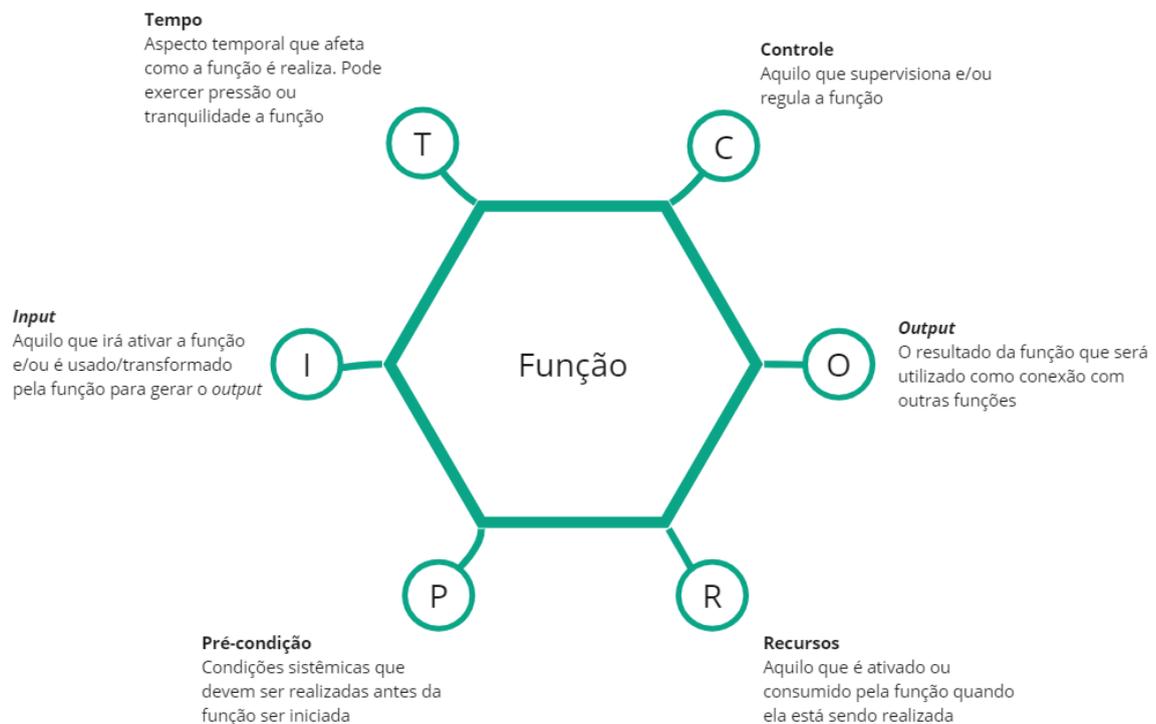
A unidade básica do FRAM é uma função que representa os meios necessários para que um objetivo seja alcançado, geralmente representado por atos ou atividades que são necessárias para produzir um resultado específico, sendo uma regra para sua caracterização

que seja descrita por um verbo ou frase verbal na forma infinitiva. Além disso, uma função pode ser classificada como *foreground e background*. A primeira diz respeito às que fazem parte do foco do estudo e a sua variabilidade pode ter consequências para o resultado do evento ou processo em análise. Já a segunda, corresponde a algo que é utilizado pelas funções primárias, mas se presume estáveis na situação considerada apesar de afetarem como o evento progride (ex: instruções de uma tarefa, regras de qualidade, etc).

As classificações *foreground e background* referem-se ao papel da função no modelo de estudo, mas também é possível classificá-las de acordo com a relação temporal entre uma função que está em foco com as demais, sendo as funções que já foram realizadas chamadas de *upstream* e as que seguem a função que está em foco de *downstream*.

Ademais, uma função é composta por 6 aspectos: tempo; controle; *output*; recurso; pré-condição; e *input* que devem ser descritos quando forem considerados relevantes pela equipe de análise, mas é essencial que, ao menos, os campos de *input* e *output* sejam descritos para todas funções *foreground* (Hollnagel, 2012). Cada aspecto deve ser descrito como um substantivo ou frase nominal por retratar o estado ou resultado de algo, não uma atividade e suas definições estão apresentadas a seguir (Figura 3).

Figura 3: Unidade básica do FRAM



Fonte: Adaptado de Hollnagel, 2012

### 2.5.3.1. Tipos de funções

É possível classificar as funções dentro do FRAM de acordo com a maneira que são executadas. As funções tecnológicas são executadas por diversas máquinas que, em sua maioria, fazem uso da tecnologia da informação e são projetadas para serem previsíveis e confiáveis. Dessa forma, o modelo a considera estável a menos que exista um motivo para considerar o contrário. As funções humanas são performadas por indivíduos ou pequenos grupos, sendo que as pessoas reagem prontamente a mudanças e em resposta a outras pessoas. Nesse sentido, podem sofrer variações muito grandes e com alta frequência, sendo suscetíveis a alterações nas condições de trabalho. Por fim, as funções organizacionais são desempenhadas por grupos maiores que possuem atividades explicitamente desenhadas e organizadas. Elas diferem das humanas pelo nível em que são descritas e por serem do próprio sistema em que estão inseridas. Assim, possuem variabilidade baixa e amplitude alta. Nesse sentido, é possível consolidar as características destas 3 funções no quadro-resumo abaixo:

Tabela 2: Tipos de função no modelo FRAM

	<b>Execução</b>	<b>Variabilidade</b>	<b>Amplitude</b>
Tecnológica	Máquinas com uso frequente da tecnologia da informação	Baixa	Pequena
Humana	Indivíduos ou pequenos grupos formais ou informais	Alta	Grande
Organizacional	Grupos grandes com funções do próprio sistema	Baixa	Grande

Fonte: Adaptado de Hollnagel, 2014

### 2.5.3.2. Relação entre funções

O ponto de partida para uma análise tradicional seria uma observação das relações específicas entre elementos na forma de causa e efeito. Contudo, a base do FRAM centra-se nas próprias funções, não se importando com sua ordenação ou relacionamento entre si. Nesse sentido, seu relacionamento é descrito de maneira indireta pelos aspectos das funções, conhecido por acoplamento.

Os acoplamentos descritos no FRAM, ou seja, os aspectos que uma função compartilha por dependência são chamados de acoplamentos potenciais, isso porque o FRAM descreve relacionamentos potenciais sem se referir a uma situação específica. Sendo assim, apenas um subconjunto dos acoplamentos potenciais pode ser realizado, os acoplamentos ou dependências reais que ocorreram ou são esperados em uma situação ou cenário específico.

Assumindo que o resultado de uma atividade segue uma distribuição normal, então o objetivo do FRAM é descrever 98,8% das situações centrais que podem ocorrer no modelo de estudo e não focar-se nas extremidades que contemplam acidentes sérios e sucessos conspícuos.

#### 2.5.3.3. Desenvolvimento do FRAM

O FRAM pode ser utilizado como uma base para análise de eventos (retrospectiva) ou também como uma avaliação de riscos proativa. O primeiro tem o propósito de fornecer uma série de saídas observadas ou consequências, podendo ser causas imediatas ou causas ocultas. Geralmente inicia-se pelo resultado adverso observado e vai retornando até achar algo que falhou. Já o segundo caso tem o propósito de identificar os riscos que podem tornar difícil ou impossível para o sistema cumprir o seu propósito e, no futuro, calcular a probabilidade desse cenário ocorrer.

Para desenvolver o modelo, é necessário caracterizar cada função do sistema completando a maior quantidade dos aspectos da função possível. Ele pode, em princípio, ser iniciado com qualquer função porque o próprio método garante que todas as funções necessárias sejam descritas, já que suas iterações garantem que ele seja completo e robusto. Nesse sentido, é comum que alguns detalhes tomem mais relevância ao longo do desenvolvimento do modelo e precisem se tornar uma função *foreground*.

A caracterização da variabilidade em um modelo FRAM é o ponto central e possibilita que a análise fuja do equívoco de que as fontes de trabalho bem-sucedido são diferentes das falhas (Ham, 2021), sendo concentrada majoritariamente nos *outputs* e não na variabilidade da função em si. Em princípio, existem 3 razões principais para que um *output* de uma função seja variável, são eles (Hollnagel, 2014):

1. Variabilidade Endógena: resultado de uma variabilidade do caráter da própria função;

2. Variabilidade Exógena: resultado de uma variabilidade nas condições em que a função está sendo realizada (ex: ambiente de trabalho);
3. Acoplamento funcional *upstream-downstream*: resultado de uma variabilidade das funções *upstream* já que fornecem diversos aspectos para as funções de *downstream*, sendo essa a base para a ressonância funcional.

Para análise da variabilidade é necessário avaliar 2 fenótipos fundamentais: precisão e tempo. Como um *output* proporciona um acoplamento entre funções *upstream-downstream*, seu significado é relativo, mas pode ser classificado como preciso, aceitável ou impreciso. Um *output* é dito preciso quando atende às necessidades da função *downstream* e, portanto, não aumenta sua variabilidade, aceitável quando pode ser usada por uma função *downstream* desde que seja feito algum ajuste ou variabilidade na função receptora, e imprecisa quando não pode ser usada, mas requer interpretação, verificação, comparação com outras informações ou com a situação em si, sendo que todas essas atividades podem aumentar a variabilidade na função receptora e consumir tempo e recursos. Em relação ao tempo, o *output* pode ocorrer muito cedo, na hora, muito tarde ou não ocorrer.

Ainda, é imperioso que seja feita uma distinção entre a variabilidade potencial e real no sentido de como suas consequências podem ser propagadas e como podem afetar as funções *downstream*. A variabilidade potencial descreve o que pode acontecer sob diferentes condições, enquanto a real descreve o que deve ser realisticamente esperado de acontecer sob condições específicas. Assim sendo, a variabilidade real é sempre um subconjunto da potencial e uma análise de acoplamento e ressonância deve ser realizada apenas tendo ela como referência, já que deve ser realizada apenas para uma instância do modelo.

Esta etapa concentra-se no exame de instâncias específicas do modelo para entender como a variabilidade de cada função pode se tornar ressonante, levando a resultados inesperados, conforme afirmado pelo processo de ressonância funcional. A variabilidade de uma função resulta como uma combinação da própria variabilidade da função e da variabilidade decorrente das saídas das funções *upstream*, dependendo do tipo de função e do tipo de aspectos vinculados. Vale ressaltar que o FRAM utiliza tanto os aspectos contidos na *blunt end* quanto na *sharp end* já que ambos podem provocar variabilidade na performance.

Dado que a variabilidade é descrita em decorrência do *output* de uma função, é possível ocorrer um acoplamento entre ele e um dos outros 5 aspectos da outra função (*input*, tempo, controle, pré-condição e recurso). Para cada tipo, a variabilidade pode aumentar, diminuir ou permanecer inalterada. Nas situações em que a ressonância funcional acontece, a combinação dessa variabilidade pode resultar em um cenário que o sistema perde sua capacidade de administrar essas variabilidades de maneira segura. O FRAM está finalizado quando não existe nenhum aspecto “solto” e todas as funções e variabilidades foram identificadas.

Com base nisso, é necessário desenvolver contramedidas efetivas, a fim de manter o sistema em um estado seguro, mas também podem ser usados para sustentar ou amplificar a ressonância funcional que leva a resultados desejados ou melhores, já que a variabilidade, mesmo fora de controle, também pode induzir a resultados positivos (Hollnagel, 2012). Formas de detectar a variabilidade, como indicadores, por exemplo, devem ser adotadas para permitir o controle (Hollnagel et al., 2014).

## 2.6. Gestão de desenvolvimento de produto

A Gestão de Desenvolvimento de Produto (GDP) é um conjunto de atividades que envolve grande parte dos departamentos dentro de uma empresa e que possui o objetivo de transformar a necessidade dos clientes e do mercado em si em produtos ou serviços que sejam economicamente viáveis (KAMINSKI, 2000). Além disso, considera as possibilidades tecnológicas e estratégias competitivas empresariais para que seja possível chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção (ROZENFELD ET AL, 2006). Nesse sentido, a GDP vai desde a identificação de oportunidades até sua transformação em produto disponível no mercado (CLARK & WHEELWRIGHT, 1993).

Existem 4 categorias de desenvolvimento de processos e produtos baseadas no grau de novidade e mudança tecnológica: Projetos incrementais ou derivativos; Projetos radicais ou breakthroughs; Projetos de plataforma ou próxima geração e Projetos de desenvolvimento avançado, também denominado Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) (CLARK & WHEELWRIGHT, 1993).

## 2.7. Prototipagem

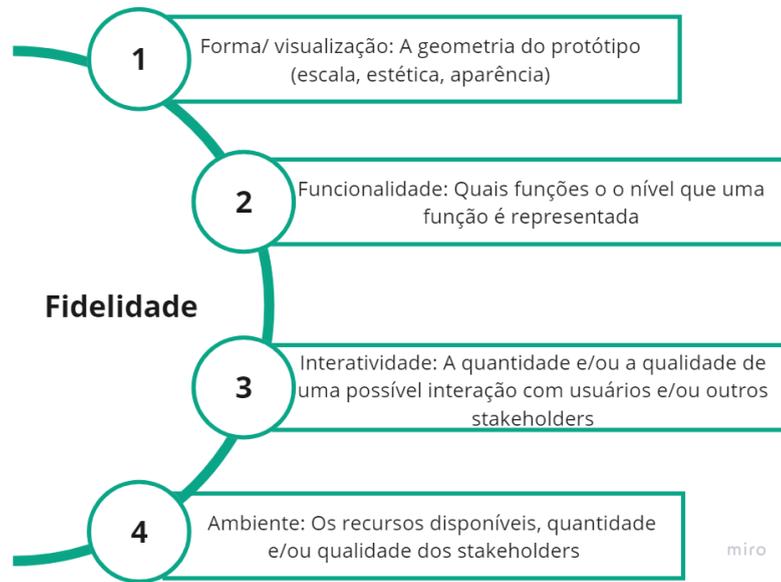
O processo de construção dos protótipos, ou prototipagem, é uma etapa pertencente ao desenvolvimento de produtos e ocorre concomitantemente ao processo e contribui para a identificação de oportunidades, validação de hipótese e teste de desempenho baseado nos requisitos do projeto. Ela é por si só uma maneira de resolução de problemas no que se refere à concepção de um produto e evolui em conjunto com o processo de design, sendo que quanto mais complicado é o produto final que se almeja, mais condicionamentos estarão envolvidos e mais protótipos serão necessários para sua concepção (BJARKI, 2012). Os produtos que envolvem uma mudança tecnológica mais significativa e possuem um alto custo associado a uma falha de projeto, representam um campo importante para prototipagem, pois, nas fases iniciais do Projeto de Desenvolvimento de Produto (PDP), a procura detalhada por problemas ajuda a reduzir os riscos da inovação decorrente da flexibilidade nessa etapa para o projeto assimilar alterações com menores dificuldades (VOLPATO ET AL, 2007).

Os protótipos, além de serem testados em laboratório e em campo para garantir que o produto final realize sua função de forma segura e eficiente, também devem demonstrar como será o processo de fabricação, que deve ser o mais simplificado possível, resultando em custos baixos e ao mesmo tempo mais confiáveis e de melhor qualidade (HOOLEY ET AL, 2001).

Ela varia de acordo com a etapa em que se encontra o projeto, podendo ser virtual, prototipagem rápida (experimentação real) ou protótipos em isopor. A prototipagem rápida pode ser definida como um processo de fabricação que utiliza a adição de material em camadas finas e sucessivas, com a fabricação de objetos físicos e em três dimensões de forma rápida, automatizada e totalmente flexível (VOLPATO ET AL, 2007). Esse tipo de prototipagem pode reduzir o tempo de desenvolvimento de atividades além do próprio PDP, como por exemplo o planejamento da fabricação do molde, estudos de acondicionamento e aplicações mercadológicas (NETTO ET AL, 2003).

Uma característica importante dos protótipos a ser analisada no desenvolvimento de um produto é sua fidelidade; ela pode ser avaliada em 4 dimensões: grau de funcionalidade, refinamento estético, similaridade de interação e amplitude de recursos (MCCURDY ET AL, 2006). Após isso, foram incluídas as dimensões de relacionamento da informação, técnica da prototipagem, material, performance da funcionalidade e ambiente inserido (FIORINESCHI E ROTINI, 2019).

Figura 4: Dimensões da fidelidade do protótipo



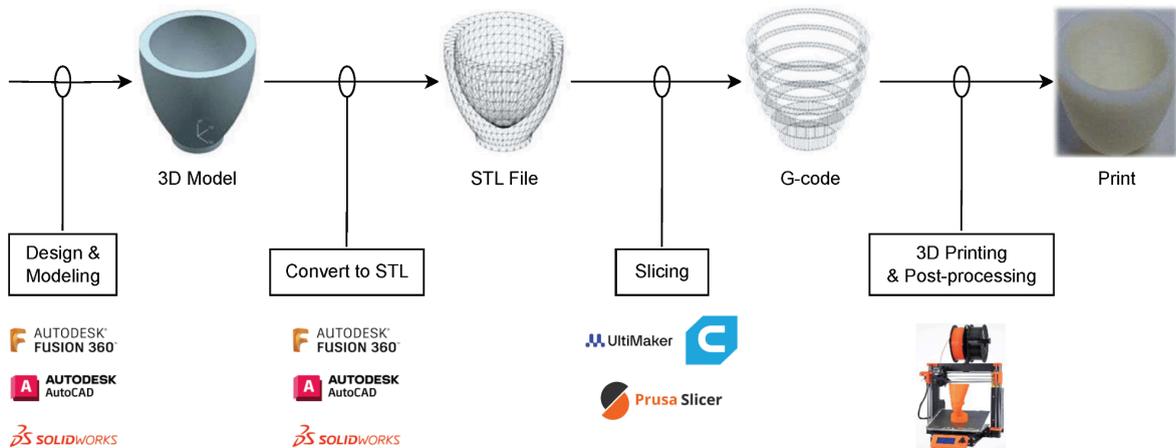
Fonte: Adaptado

## 2.8. Manufatura aditiva

A manufatura aditiva (AM), amplamente reconhecida como impressão 3D, se iniciou na década de 1980 e passou por um crescimento significativo, evoluindo de uma ferramenta de prototipagem rápida para um método de fabricação viável para um amplo espectro de aplicações, impulsionando seu uso em diversos segmentos como aeroespacial, automotivo, saúde e moda (PRASHAR ET AL, 2023). Atualmente, a AM é reconhecida por sua capacidade de personalização, redução de desperdícios e fabricação de geometrias complexas que não seriam possíveis com métodos tradicionais, o que a torna ideal para protótipos e pequenas tiragens de produção. (TOFAIL ET AL, 2018)

A tecnologia de AM mais utilizada atualmente ainda é, sem dúvida, a modelagem por deposição fundida (FDM), desenvolvida pela Stratasys no final da década de 1980. Funciona extrusando filamentos termoplásticos através de um bico aquecido, depositando o material camada por camada para construir um objeto. Nela temos as 4 etapas esboçadas a seguir para sua realização, em conjunto com ferramentas que podem ser utilizadas para efetuar cada uma delas.

Figura 5: Etapas da Manufatura Aditiva



Fonte: Adaptado

### 3. METODOLOGIA

A pesquisa científica pode ser descrita como resultado de uma análise e pode ser classificada conforme sua abordagem, natureza, objetivos e procedimentos. Quanto a abordagem, pode ser classificada como qualitativa, em que busca uma compreensão profunda do contexto analisado, ou quantitativa, em que os conceitos podem ser medidos e os resultados devem ser replicados. A natureza difere-se em básica, quando não envolve aplicação prática, e em aplicada quando envolve. Quanto aos objetivos, pode ser exploratória, descritiva ou explicativa. O primeiro visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses. O segundo visa descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. O terceiro, por fim, visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Quanto aos procedimentos, podem assumir diversas formas consoantes o objeto da pesquisa (SILVA E MENEZES, 2005). É importante compreender os tipos de pesquisas existentes para poder definir instrumentos e procedimentos que o pesquisador utilizará para planejar sua investigação (KAUARK, MANHÃES e MEDEIROS, 2010). A metodologia adotada neste projeto de graduação baseia-se na abordagem de estudo de caso único, fundamentada em referências teóricas que ressalta sua relevância e aplicabilidade em pesquisas organizacionais complexas.

O estudo de caso constitui uma abordagem de natureza predominante quantitativa e, segundo Yin (2018), é particularmente adequado para investigar fenômenos contemporâneos dentro de seus contextos reais, especialmente quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidas. Essa abordagem permite uma análise aprofundada e detalhada, proporcionando uma compreensão rica e contextualizada do objeto de estudo. A finalidade é a compreensão integral, descritiva e interpretativa, e estruturante do objeto de estudo, numa perspectiva de desocultação e descoberta. Assim, um estudo de caso único é um projeto que observa exclusivamente uma unidade, permitindo um entendimento mais exato, porém aprofundado, das circunstâncias estudadas, o que faz com que os resultados sejam mais confiáveis. Para Goode e Hatt, o estudo de caso é um meio de organizar os dados, preservando do objeto estudado o seu caráter unitário.

As características específicas, conforme descritas por Yin (2001; 1984), são três e incluem:

1. Necessidade de um caso completo, considerando as fronteiras do caso, a análise minuciosa das evidências e a conclusão do estudo sem restrições de tempo e recursos;
2. Consideração de perspectivas ou hipóteses alternativas, buscando explicações diferentes e examinando as evidências sob essas perspectivas;
3. Apresentação de evidências conclusivas de forma atrativa para o leitor.

Com base nesses autores, Alves-Mazzotti (2006) destaca dois critérios distintivos do estudo de caso: a) a investigação de um fenômeno social original e complexo, mantendo a visão holística dos eventos da vida; b) um estudo detalhado e contextualizado de um fenômeno que constitui um sistema delimitado. Considerando o objetivo do trabalho, fica evidente tratar-se de um caso completo e único que abrange apenas o Laboratório Aberto de Brasília, em especial a fronteira contemplada pelo sistema de prototipagem, que constitui um sistema complexo devido seu alto grau de incerteza e falta de padronização do processo.

Neste trabalho, a metodologia será desenvolvida em três etapas principais. A primeira etapa envolve a construção de um questionário semiestruturado, com o objetivo de captar as diferentes experiências e percepções de ex-membros e atuais membros do LAB que estiveram envolvidos em projetos de prototipagem. O questionário incluirá perguntas abertas e fechadas, abordando aspectos como a descrição do processo de prototipagem, os principais desafios

enfrentados, variações nos métodos utilizados, identificação de pontos fortes e fracos do processo, e sugestões de melhoria. Na segunda etapa, as entrevistas serão conduzidas individualmente, utilizando o questionário como guia. As respostas serão coletadas e posteriormente transcritas para permitir uma análise qualitativa detalhada. Essa análise buscará identificar padrões, divergências e insights sobre como o processo de prototipagem foi conduzido em diferentes projetos e por diferentes membros do LAB.

Nesse estudo de caso, a ausência de uma estrutura definida para o processo de prototipagem no laboratório dá um grau grande de incerteza de seu funcionamento e essas duas etapas são cruciais como ferramentas de coleta de dados. Pela falta de método específico, eles podem ter seguido diferentes abordagens, adaptando o processo às suas necessidades e contextos específicos, podendo ter variado significativamente entre os projetos. Sendo assim, essa variabilidade também deve ser compreendida para a modelagem adequada do sistema.

Por fim, a terceira etapa consiste na modelagem do processo de prototipagem utilizando o FRAM utilizando-se dos dados coletados nas etapas anteriores que serviram de base para identificar as funções presentes no sistema. Essa modelagem ajuda a compreender como as variações no processo impactam o resultado final e onde essas variações podem potencialmente causar problemas ou criar oportunidades de melhoria. Portanto, o objetivo é capturar não apenas as funções realizadas em situações normais, mas também como essas funções podem se comportar em condições de variabilidade, como mudanças nos requisitos do projeto, limitações de recursos ou falhas de comunicação entre os membros do LAB. Em seguida, serão propostas melhorias baseadas nos princípios da engenharia de resiliência, com o intuito de aumentar o desempenho e a robustez do sistema, baseadas nas vulnerabilidades e oportunidades identificadas na análise do FRAM.

### 3.1. Questionário

Para desenvolver um questionário eficaz para a coleta de dados, é fundamental seguir alguns critérios específicos e não a intuição. Segundo Dillman, Smyth e Christian (2014), as perguntas devem ser formuladas de maneira clara e direta, garantindo que os respondentes compreendam exatamente o que está sendo solicitado e possam fornecer respostas precisas. Além disso, Fowler (2014) enfatiza a necessidade de garantir que as perguntas se relacionem diretamente com os objetivos da pesquisa para que os dados coletados sejam úteis e

pertinentes, sendo assim, o questionário deve ter uma organização lógica, iniciando com perguntas mais abrangentes e ir avançando para aspectos mais específicos à medida que o entrevistado vai respondendo. Dessa forma, a estrutura deve facilitar a fluidez do questionário e a compreensão de todo o contexto pelo respondente (Oppenheim, 2012).

Com base nesses critérios, foi construída uma versão do questionário a ser aplicado com os integrantes do LAB em posterior entrevista semi estruturada com base na tabela a seguir.

Tabela 3: Questionário para entrevistas

<b>Categoria</b>	<b>Pergunta</b>
Informações Gerais	Qual o seu nome?
	Qual é seu relacionamento com o Laboratório Aberto de Brasília?
	Qual curso você cursa/cursou?
	Em qual semestre você está?
	Quanto tempo você esteve envolvido com projetos de prototipagem dentro do Laboratório Aberto de Brasília?
	Em quantos projetos você esteve envolvido aproximadamente?
Entendimento geral da prototipagem	Como você descreveria o processo de prototipagem que foi utilizado em seus projetos em aspectos gerais?
	Quais tipos de projeto você realizou? Existiam diferenças entre os projetos no que tange a escopo, maturidade ou entrega final?
	Existiu alguma adaptação necessária que você teve que fazer para conseguir prototipar algum projeto que participou? Quais foram elas?
Avaliação da fase de prototipagem	Como você avalia a dificuldade para construir um protótipo num projeto do Laboratório Aberto de Brasília?
	Como você avalia a estrutura da etapa de prototipagem do Laboratório Aberto de Brasília?
	Quais foram os principais desafios que você enfrentou durante o processo de prototipagem?
	Como você lidou com mudanças inesperadas ou problemas durante a prototipagem?
	Na sua opinião, quais foram os pontos fortes do

	processo de prototipagem que você utilizou? Como você sugeriria alavancá-los?
	Quais foram os pontos fracos ou áreas que precisam de melhoria no processo de prototipagem? Como você sugeriria atenuá-los?

Fonte: Autoria própria

### 3.2. Entrevistas

As entrevistas semi-estruturadas são uma técnica qualitativa amplamente utilizada em pesquisas acadêmicas. Este método combina um roteiro de perguntas previamente elaborado com a liberdade de explorar novos temas que surgem durante a conversa, permitindo uma compreensão mais profunda e contextualizada dos fenômenos estudados. O principal objetivo das entrevistas semi-estruturadas é capturar as nuances e complexidades das experiências e perspectivas dos participantes, que podem não ser evidentes através de métodos mais rígidos (Creswell, 2014; Yin, 2018). O processo inicia-se com a elaboração de um roteiro de entrevista, que inclui perguntas abertas destinadas a promover respostas ricas e detalhadas, que foi realizado com a construção do questionário anteriormente detalhado. Embora essas perguntas forneçam uma estrutura para a entrevista, o entrevistador deve estar preparado para seguir novos tópicos e explorar áreas emergentes de interesse. Essa flexibilidade é uma vantagem significativa, permitindo que o entrevistador adapte a conversa de acordo com as respostas dos participantes e aprofunde a investigação em áreas inesperadas (DiCicco-Bloom & Crabtree, 2006).

Outro aspecto relevante é a escolha dos entrevistados. Ela deve ser baseada em critérios relevantes para o estudo, como a experiência específica no LAB ou familiaridade com algumas etapas do processo de prototipagem, isso garante que as informações coletadas sejam condizentes com a realidade e representativas (Miles & Huberman, 1994). Para a avaliação do tema do presente trabalho foram levantados com a professora responsável pelo projeto do Laboratório Aberto de Brasília, quais seriam as pessoas mais aptas a responderem sobre o tema. Ao total, foram entrevistados 2 membros atuais do LAB e 2 ex-membros para coletar suas percepções sobre a etapa de prototipagem e o laboratório como um todo.

## 4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

### 4.1. Entrevistas

Após as entrevistas, técnicas de análise qualitativa, como a análise de conteúdo ou a análise temática, são utilizadas para interpretar os dados e extrair significados relevantes (Braun & Clarke, 2006; Gibbs, 2007). Com base nisso, foi possível extrair que existem diferentes tipos de projetos dentro do LAB, são eles:

1. Fabricação de Peças: projetos em que o cliente já possui a modelagem pronta e gostaria dos serviços do laboratório apenas para a impressão;
2. Melhoria de produto: projetos em que o cliente já possui uma estrutura pronta e gostaria da consultoria do laboratório sobre como otimizar esse produto;
3. Fabricação “do zero”: projetos em que o cliente possui uma ideia e precisa que o laboratório compreenda, modele e fabrique;
4. Modelagem: projetos em que o cliente possui uma ideia e precisa que o laboratório compreenda e modele, sem a etapa de fabricação.

Em todos os projetos, independente do tipo é construído um protótipo a ser apresentado para o cliente para garantir que suas solicitações foram atendidas, contudo, nem todos necessitam de realizações de mock ups ao longo da etapa de desenvolvimento para validar algum conceito específico da solução proposta, principalmente quando o projeto apresenta algum ponto de atenção, como encaixes, resistência do produto e funções específicas do sistema, sendo isso facultado à equipe do projeto. Nesse sentido, os projetos em geral contam com 3 fases:

1. Projeto: fase em que serão levantados os requisitos do projeto com o cliente e as possíveis propostas de solução que atendam àquela demanda em específico, além dos materiais a serem utilizados;
2. Modelagem: fase em que a solução será modelada de forma digital no software de modelagem 3D e podem ser realizados mock-ups para validar alguns elementos do produto;
3. Fabricação: fase em que o objeto é impresso camada por camada de acordo com as instruções geradas pelo software de fatiamento e etapas de pós-processamento, como remoção de suportes, lixamento, e acabamento superficial.

Para o início de um projeto, a equipe de gestão do LAB realiza um diagnóstico com o cliente para avaliar o tipo de projeto que ele precisa, além dos requisitos do seu produto final. O aluno responsável pela gestão afirmou que eles tentam direcionar essa etapa para que o cliente informe principalmente a condição de uso daquele produto, com informações como modo de uso, temperatura que a peça será exposta, tipos de encaixe, etc. Em alguns diagnósticos há a presença de algum dos técnicos, mas isso não é um requisito obrigatório para essa etapa. Conforme o mesmo aluno, esses técnicos são alocados nos projetos baseados na disponibilidade, interesse pela temática e experiência sobre o tema. Os técnicos afirmaram que a equipe do projeto pode mudar com base na complexidade do projeto, necessidade de uma nova solução que exige habilidades específicas, saídas da equipe e distribuição de pessoal. Ao serem questionados sobre a documentação do projeto, os técnicos afirmaram que a documentação de todos os projetos é feita pelo Teams, além de, em casos de mudança da equipe, as modelagens feitas no software 3D são compartilhadas com os novos integrantes. Explicaram também que a documentação poderia ser melhor, mas que atende sua finalidade na medida do possível e que a parte que possui maior defasagem é a fase de projeto.

Na construção do orçamento para os clientes, é fornecido uma estimativa de tempo de conclusão de cada etapa que, segundo os membros da equipe, é flexível e baseado exclusivamente na experiência prévia deles com outros projetos acrescidos de uma margem de erro.

Durante toda a realização do projeto, ocorrem reuniões de alinhamento mensais com todos os membros do LAB em que deverão dar contexto sobre todos os projetos que estejam sendo executados a fim de que todos possuam minimamente um conhecimento de todos os projetos para caso seja necessário alocar um membro da equipe em um projeto em andamento. Após a modelagem do protótipo a ser apresentada para o cliente ocorre uma validação da gestão para entender se a solução está condizente com o conversado com o cliente e uma validação técnica, voltada a entender se a modelagem está feita de uma maneira coerente e a solução é viável. Os membros pontuaram que em épocas com grande volume de projetos, essa validação pode ser feita por outras pessoas a pedido da gestão, mas que não existe nenhum tipo de treinamento de avaliação nem pontos específicos a serem observados. Além do mencionado acima, o time de gestão também faz o controle da qualidade de impressão para garantir que esteja de acordo com os padrões estipulados.

Um ponto relevante é sobre a entrada de novas pessoas no laboratório e como é feito seu *onboarding*. Conforme documento institucional do LAB, os novos membros percorrem a jornada de capacitação iniciando com treinamentos internos, seguindo para projetos internos, passando pela resolução de problemas reais e finalizando com a realização de capacitações sobre o assunto. Dessa forma, para o indivíduo estar pronto para atender clientes, deve passar por duas etapas preparatórias para garantir seu conhecimento.

Figura 6: Fluxo de capacitação de novos membros no LAB



Fonte: Material Institucional do LAB

Os entrevistados informaram que essa fase de treinamento dura, em média, 6 meses, mas pode variar com o grau de aprendizagem do aluno e o fato de entrarem como voluntários e terem uma carga horária semanal mais baixa contribui para que o aprendizado seja mais lento. Ainda, os técnicos informaram que a etapa de projetos internos pode ser substituída pela participação restrita e monitorada numa etapa de um projeto real, como a fabricação. Além disso, afirmam que inexistem um processo formal de avaliação para saber se o membro está devidamente capacitado para avançar para a próxima etapa, sendo um critério mais subjetivo e que, em alguns momentos, percebem que algumas pessoas não se desenvolveram o suficiente em critérios específicos mesmo em fase de relacionamento com o cliente.

Por fim, ao serem questionados sobre onde ocorrem as principais falhas nos projetos tanto na etapa do protótipo a ser apresentado para o cliente quanto na fase de fabricação, afirmaram que o principal problema são falhas na impressão que podem ser causadas por diversos motivos. Dentre os citados:

- Falta de luz interrompe funcionamento das impressoras;
- Equipamento mal calibrado;
- Falta de validação técnica compromete qualidade da impressão;
- Descumprimento de algum requisito do cliente.

Ainda, informaram que o grande volume de projetos por técnico não afeta a qualidade do produto nem os controles a serem realizados, mas que um projeto com um prazo muito curto pode ter esse efeito e afetar, dentre outras coisas, a qualidade e o acabamento do produto final.

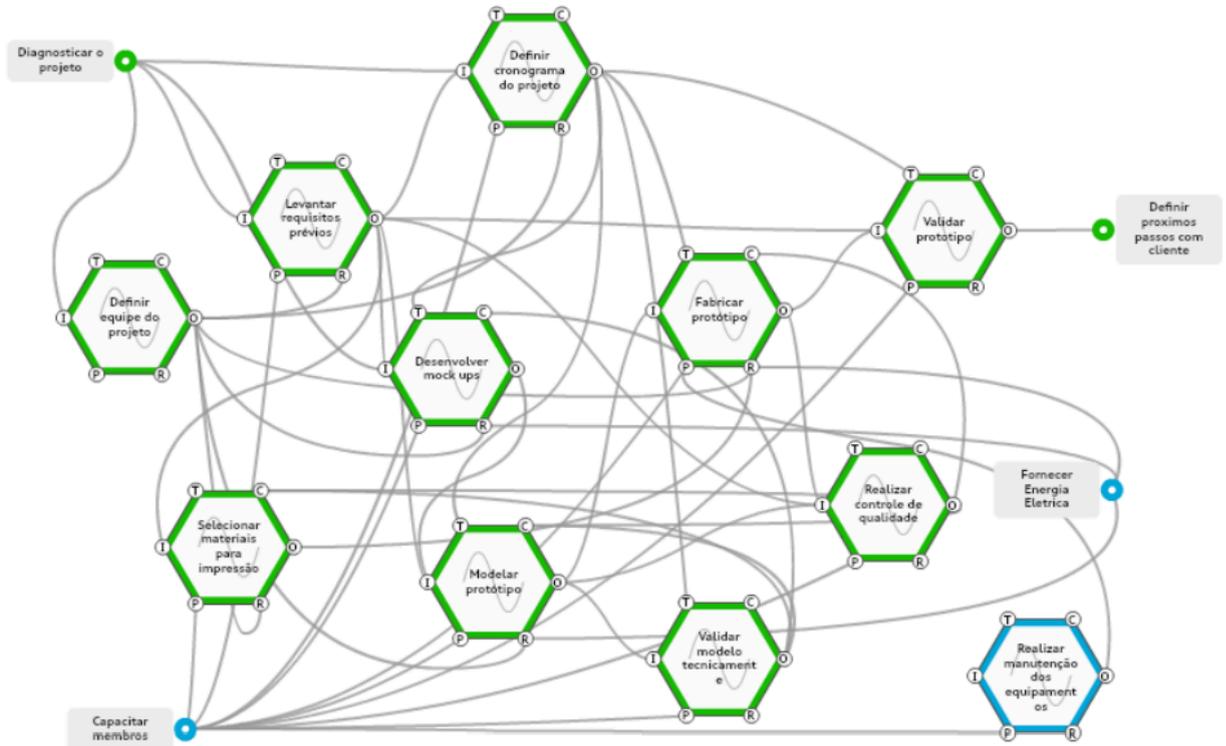
#### 4.2. Modelagem do sistema

Por meio das entrevistas, foi possível mapear a execução prática do processo de prototipagem no LAB, destacando as interações entre equipe, tecnologia e cliente. O procedimento inclui várias etapas, desde o diagnóstico inicial até a entrega do protótipo final, seguindo um fluxo de trabalho adaptável a cada projeto e às condições do laboratório. As entrevistas semi-estruturadas proporcionaram uma compreensão mais aprofundada dos desafios enfrentados no dia a dia do laboratório, além de capturar a experiência prática dos envolvidos. Essa abordagem revelou o *work as done* em vez do *work as imagined*.

Como no FRAM as diferentes funções de um sistema não funcionam de maneira independente, mas se relacionam e afetam umas às outras, mudanças no desempenho de uma função podem afetar outras funções, de forma direta ou indireta. Além disso, as funções podem representar diferentes aspectos de outras funções, como entradas, controle, requisitos prévios, recursos e tempo.

Nesse sentido, o seguinte modelo foi desenvolvido para representar o sistema de prototipagem de bens físicos do Laboratório Aberto de Brasília. As funções de *foreground* estão sinalizadas de verde, enquanto as funções de *background* estão sinalizadas de azul. Além disso, o relacionamento entre as funções está representado pelas linhas cinzas quando se está olhando toda a prototipagem, mas quando se quer olhar uma função em específico é possível selecioná-la e fica destacado em roxo, todas as outras funções que ela afeta.

Figura 7: Modelagem do FRAM para sistema de prototipagem



Fonte: Autoria própria

Um ponto relevante é que cada função deve ser identificada de acordo com seu tipo (humana, organizacional ou tecnológica) e sua variabilidade em termos de precisão e tempo. Se uma função apresentar variabilidade que possa impactar o sistema, ela deve ser sinalizada com uma onda. É importante notar que quase todas as funções geram variabilidade, por dois motivos principais. Primeiro, a maioria das funções é do tipo humana, que possui intrinsecamente uma grande amplitude e alta variabilidade. Apenas duas funções não são humanas nesse sistema: "capacitar membros" e "realizar manutenção dos equipamentos", que são funções organizacionais. Segundo, o sistema possui funções intimamente ligadas e interdependentes. Portanto, uma falha em uma função provavelmente terá impacto em outra.

O sistema inicia-se com a função de "Diagnosticar o projeto" que consiste na reunião com o cliente para entender quais os objetivos dele com um projeto com o LAB, se é possível solucionar seu problema dentro do laboratório e qual tipo de projeto atende suas necessidades (apenas fabricação, apenas modelagem, fabricação "do zero" ou melhoria de produtos). Essa etapa é guiada por um membro da gestão e pode contar, opcionalmente, com um técnico. Com

base nessa etapa que os requisitos serão levantados e todo projeto será baseado, sendo ela de extrema importância para compreensão do sistema e para a sua precisão.

Figura 8: Função de diagnóstico do projeto

<b>Nome da função</b>	<b>Diagnosticar o projeto</b>
Descrição	Reunião agendada com o cliente com a gestão do lado e, opcionalmente, um técnico, para entender as expectativas do cliente com o projetos e o tipo de projeto que está mais adequado as suas necessidades
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	
Saídas	Diagnostico com definição do tipo de projeto
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

Fonte: Autoria própria

Com base na etapa anterior, os requisitos técnicos e funcionais são definidos. Atualmente essa etapa acontece de maneira intuitiva e natural do processo, mas não é documentada formalmente, o que pode gerar dificuldades no sistema caso seja necessário retomar essa informação numa eventual mudança de equipe, por exemplo. Além disso, caso esses requisitos sejam definidos sem a devida contextualização dos objetivos e necessidades do cliente, pode levar a uma imprecisão no sistema que irá ressonar em outras funções.

Figura 9: Função de levantamento dos requisitos prévios

<b>Nome da função</b>	<b>Levantar requisitos prévios</b>
Descrição	Com base na reunião de diagnóstico, definir quais são os requisitos técnicos e funcionais do produto e entender se existe alguma solicitação específica do cliente que possa gerar adaptações no projeto
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Diagnostico com definição do tipo de projeto
Saídas	Lista de requisitos técnicos e funcionais
Pré-requisitos	Conhecimento tecnico da equipe
Recursos	Equipe definida
Controlo	
Tempo	

Fonte: Autoria própria

Ao entender as necessidades do cliente, a gestão compreende as capacidades técnicas necessárias para realizar o projeto e define a equipe com base nesse aspecto, além do interesse do próprio aluno e disponibilidade.

Figura 10: Função de definição da equipe do projeto

<b>Nome da função</b>	<b>Definir equipe do projeto</b>
Descrição	Definir o tamanho da equipe com base no diagnóstico e quais membros do LAB desenvolverão o projeto. Escolha feita com base em: disponibilidade, interesse pela temática e conhecimento técnico sobre o tema
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Diagnostico com definição do tipo de projeto
Saídas	Equipe definida
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

Fonte: Autoria própria

A equipe responsável pelo projeto irá compreender os requisitos técnicos e funcionais do projeto e estimar o tempo necessário para realizar cada uma das etapas (projeto, modelagem e fabricação). À essa estimativa é acrescentada uma margem de erro para dar mais flexibilidade à equipe em caso de imprevistos, mas quando o cliente pontua que quer o projeto com urgência pode gerar repercussões em todo sistema e alguns controles podem ser afetados, como as funções de “Validar modelo tecnicamente” e “Realizar controle de qualidade”.

Figura 11: Função de definição do cronograma do projeto

<b>Nome da função</b>	<b>Definir cronograma do projeto</b>
Descrição	Definir duração das etapas do projeto para serem definidas no orçamento enviado ao cliente. É flexível e baseado exclusivamente na experiência prévia da equipe com outros projetos acrescidos de uma margem de erro.
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Diagnostico com definição do tipo de projeto Lista de requisitos técnicos e funcionais
Saídas	Cronograma do projeto
Pré-requisitos	Conhecimento tecnico da equipe
Recursos	Equipe definida
Controlo	
Tempo	

Fonte: Autoria própria

A função de “Selecionar materiais para impressão” existe para que a equipe defina o material mais adequado para a fabricação do protótipo, considerando os requisitos técnicos e funcionais estabelecidos no projeto, como resiliência ou resistência a uma temperatura específica. Caso os requisitos não sejam compreendidos da forma correta, o material pode ser

escolhido com base em critérios equivocados, o que resulta em um protótipo que não atende suas finalidades.

Figura 12: Função de seleção de materiais para impressão

Nome da função	Selecionar materiais para impressão
Descrição	Definição de qual material é o mais ideal para a impressão do produto com base nos requisitos levantados
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	Lista de requisitos técnicos e funcionais
Saídas	Materiais de impressão selecionados
Pré-requisitos	Conhecimento técnico da equipe
Recursos	Equipe definida
Controlo	Validação pela equipe técnica
	Validação pela gestão do LAB
Tempo	Cronograma do projeto

Fonte: Autoria própria

Em alguns projetos, antes de modelar e imprimir o protótipo, a equipe precisa validar algumas partes específicas da proposta de solução, para isso desenvolve *mock ups*. Eles são mais utilizados em projetos que são projetados no laboratório e, em especial, aqueles que possuem algum ponto de atenção como encaixes e roscas ou precisam resistir a critérios específicos ou ainda a equipe não possui tanta familiaridade com o escopo. Seu desenvolvimento é opcional e decidido pela equipe do projeto, mas auxilia a reduzir as falhas de impressão do protótipo final. Alguns exemplos de materiais que podem ser usados são:

- PLA: Material comum para prototipagem rápida, sendo biodegradável e fácil de usar. É ideal para peças que não exigem alta resistência mecânica ou exposição a altas temperaturas.
- ABS: Um plástico mais resistente, frequentemente utilizado em protótipos que exigem durabilidade e resistência ao calor.
- PETG: Um material com boa resistência mecânica e alta durabilidade, ideal para peças que exigem flexibilidade e resistência a impactos.

Figura 13: Função de desenvolvimento de *mock ups*

<b>Nome da função</b>	<b>Desenvolver mock ups</b>
Descrição	Objetivo de validar algum conceito específico da solução proposta,. Usada principalmente quando o projeto apresenta algum ponto de atenção, sendo os principais: encaixes, resistência do produto e funções específicas do sistema que a equipe não está tão familiarizada. Etapa facultativa e decidida pela própria equipe
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Diagnostico com definição do tipo de projeto Lista de requisitos técnicos e funcionais
Saídas	Mock ups realizados e solução validada
Pré-requisitos	Conhecimento tecnico da equipe
Recursos	Equipe definida Energia Eletrica
Controlo	Validação pela equipe tecnica
Tempo	Cronograma do projeto

Fonte: Autoria própria

Com a proposta de solução e a melhor abordagem para o projeto definidas, a equipe deve modelar o protótipo em um software e realizar o fatiamento, que se refere ao processo de conversão de um modelo 3D digital em instruções que a impressora 3D possa seguir para construir o objeto camada por camada. Essa modelagem será validada tanto pelo supervisor técnico do laboratório quanto pela gestão, sendo que o primeiro avaliará a qualidade da modelagem e a viabilidade da solução proposta, enquanto o segundo valida se está de acordo com o conversado com o cliente com o objetivo de realizar um controle de qualidade. Em contextos de muitos projetos, a validação pode ser feita por algum dos técnicos que não esteja envolvido no projeto, mas não existem critérios claros do que deve ser observado. Além disso, o cronograma enxuto pode colocar pressão no sistema para que essa etapa aconteça de forma mais rápida, o que pode ocasionar em uma não percepção de erros e impressões equivocadas.

Figura 14: Função de modelagem do protótipo

<b>Nome da função</b>	<b>Modelar protótipo</b>
Descrição	Modelagem e fatiamento da versão de protótipo a ser apresentada para o cliente
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Lista de requisitos técnicos e funcionais Mock ups realizados e solução validada
Saídas	Modelo 3D digital do produto
Pré-requisitos	Conhecimento tecnico da equipe
Recursos	Equipe definida Energia Eletrica
Controlo	Validação pela equipe tecnica Validação pela gestão do LAB
Tempo	Cronograma do projeto

Fonte: Autoria própria

Figura 15: Função de validação do modelo tecnicamente

<b>Nome da função</b>	<b>Validar modelo tecnicamente</b>
Descrição	Etapa feita pelo supervisor técnico que ira identificar se a proposta de solução e a modelagem estão tecnicamente bem desenvolvidas
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Modelo 3D digital do produto
Saídas	Validação pela equipe tecnica
Pré-requisitos	Conhecimento tecnico da equipe
Recursos	
Controlo	
Tempo	Cronograma do projeto

Fonte: Autoria própria

A função de “Realizar controle de qualidade” também ocorre após a impressão com o objetivo de conferir se não existe alguma falha estrutural ou estética no protótipo. Também não é feita com critérios definidos de análise e pode ser flexibilizada com o cronograma do projeto, o que gera variabilidade.

Figura 16: Função de realização do controle de qualidade

<b>Nome da função</b>	<b>Realizar controle de qualidade</b>
Descrição	Etapa realizada pela equipe de gestão para garantir que a solução está de acordo com as expectativas do cliente e que não possui nenhuma falha visual e/ou estrutural
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Modelo 3D digital do produto
	Protótipo físico
	Lista de requisitos técnicos e funcionais
Saídas	Validação pela gestão do LAB
Pré-requisitos	Conhecimento técnico da equipe
Recursos	
Controlo	
Tempo	

Fonte: Autoria própria

Após a modelagem e respectivas validações, segue-se para a função mais complexa do sistema, a de fabricação do protótipo. Isso porque envolve várias etapas técnicas que são essenciais para garantir que o protótipo final atenda aos requisitos de qualidade e funcionalidade. Esses passos incluem a calibração da impressora 3D, o carregamento do arquivo de impressão realizado em etapas anteriores, a impressão de fato realizada pela impressora e o pós-processamento do protótipo. Se estas etapas não forem bem controladas, podem gerar variabilidades que afetam a qualidade e o tempo de entrega do protótipo, como exigir da função de controle de qualidade uma resposta sobre pressão, caso a etapa seja realizada com um tempo superior ao previsto.

Durante a etapa de fatiamento, é gerado o arquivo G-code, que contém todas as instruções necessárias para a fabricação do protótipo na impressora 3D, como os caminhos de impressão, a espessura das camadas e os ajustes de temperatura. Qualquer erro na configuração do arquivo, seja no processo de fatiamento ou no carregamento, pode comprometer a precisão da impressão. A calibração da impressora é crucial para garantir a qualidade das camadas impressas e evitar problemas como falhas de adesão ou distorções nas peças. Isso envolve ajustes críticos, como a altura do bico extrusor, o nivelamento da cama de impressão e os parâmetros de temperatura. Dependendo da complexidade do projeto e das configurações definidas, o processo de impressão pode variar de algumas horas a vários dias.

Após a impressão, o protótipo passa pelo pós-processamento, etapa essencial para assegurar que o produto final atenda aos requisitos estéticos e funcionais. Esse processo pode

incluir a remoção de suportes de impressão, lixamento, polimento e outras ações que melhoram a qualidade e o acabamento do protótipo.

Figura 17: Função de fabricação do protótipo

<b>Nome da função</b>	<b>Fabricar protótipo</b>
<b>Descrição</b>	Envolve várias etapas técnicas que são essenciais para garantir que o protótipo final atenda aos requisitos de qualidade e funcionalidade. Esses passos incluem a calibração da impressora 3D, o carregamento do arquivo de impressão, e o pós-processamento do protótipo após a impressão.
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
<b>Entradas</b>	Modelo 3D digital do produto
<b>Saídas</b>	Prototipo físico
<b>Pré-requisitos</b>	Impressoras calibradas e operacionais
	Conhecimento técnico da equipe
<b>Recursos</b>	Energia Elétrica
	Materiais de impressão selecionados
	Equipe definida
<b>Controlo</b>	Validação pela gestão do LAB
<b>Tempo</b>	Cronograma do projeto

Fonte: Autoria própria

Com o protótipo impresso, pós-processado e validado pela gestão de forma em que não haja nenhuma avaria, o protótipo é apresentado ao cliente com uma recapitulação dos requisitos apresentados e uma demonstração do protótipo construído. Além disso, é essencial compreender se o cliente tem interesse em fabricar em maior escala dentro do laboratório ou se sua demanda se restringe à modelagem. Nessa etapa, caso o diagnóstico e os requisitos não tenham sido feitos de forma completa e precisa, não haverá o atendimento das necessidades do cliente ou esse será parcial, o que gera muito retrabalho para a equipe. Além disso, é possível que o cliente não tenha externalizado uma necessidade e manifeste isso após a etapa de fabricação, sendo um desafio pontuado pelos técnicos, que também informaram ser isso responsabilidade do cliente e que, caso desejado, deverá contratar um novo serviço de modelagem.

Figura 18: Função de validação do protótipo

<b>Nome da função</b>	<b>Validar prototipo</b>
Descrição	Apresentar o protótipo físico ao cliente para entender se atende suas expectativas
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Prototipo físico
	Lista de requisitos técnicos e funcionais
Saídas	Prototipo físico validado
Pré-requisitos	Conhecimento tecnico da equipe
Recursos	
Controlo	
Tempo	Cronograma do projeto

Fonte: Autoria própria

Figura 19: Função de definição dos próximos passos

<b>Nome da função</b>	<b>Definir proximos passos com cliente</b>
Descrição	Entregar o protótipo definitivo e formalizar a conclusão do projeto, tendo a possibilidade de realizar outro prototipo caso o cliente queira fazer um ajuste ou imprimir produto em escala
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Prototipo físico validado
Saídas	
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

Fonte: Autoria própria

Por fim, existem algumas funções de suporte ou background para o sistema, são elas: “Capacitar membros”, “Realizar manutenção dos equipamentos” e “Fornecer energia elétrica”. A função de capacitação é fundamental para garantir que os novos membros do LAB estejam prontos para atender clientes e participar de projetos reais. Ela envolve uma série de sessões de treinamento que abrangem aspectos técnicos e operacionais, além de um período de aprendizagem que inclui o trabalho em projetos internos. Como todo sistema depende do conhecimento técnico da equipe, caso essa etapa não seja realizada de forma condizente, pode desencadear em uma série de erros em praticamente todas as funções do sistema. Além disso, essa função abrange também a reciclagem dos alunos mais experientes, a fim de garantir que todos estejam atualizados com as melhores práticas e novas tecnologias.

Figura 20: Função de capacitação de membros

<b>Nome da função</b>	<b>Capacitar membros</b>
Descrição	Capacitação para novos membros para atender clientes, passando pelas etapas de treinamentos e projetos internos, ou reciclagem dos alunos
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	
Saídas	Conhecimento tecnico da equipe
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

Fonte: Autoria própria

O fornecimento de energia elétrica é uma condição básica, mas vital, para o funcionamento dos equipamentos eletrônicos no LAB, como impressoras 3D, computadores e outros dispositivos. Sem energia, o processo de prototipagem, que utiliza impressoras 3D por horas ou até dias, pode ser interrompido, resultando em falhas nos projetos ou atrasos na entrega. A energia elétrica também é fundamental para alimentar os computadores usados para modelagem 3D e o software de fatiamento, que transformam os modelos digitais em arquivos prontos para impressão. Sendo assim, é um recurso em inúmeras funções e que a equipe possui controle, mas que pode gerar variabilidade no sistema.

Figura 21: Função de fornecimento de energia elétrica

<b>Nome da função</b>	<b>Fornecer Energia Eletrica</b>
Descrição	Energia para funcionamento dos computadores, impressoras e demais equipamentos eletrônicos
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	
Saídas	Energia Eletrica
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

Fonte: Autoria própria

A manutenção dos equipamentos durante o processo de prototipagem é fundamental para garantir o pleno funcionamento das máquinas e ferramentas, principalmente das impressoras 3D, com ações tanto preventivas quanto corretivas. A primeira é utilizada para evitar problemas durante o uso, incluindo limpeza de peças móveis, lubrificação de peças, ajuste de calibração da impressora e inspeções regulares para garantir que o equipamento

esteja funcionando com eficiência máxima. Já a segunda é realizada apenas caso ocorra alguma falha inesperada, como bico de impressão entupido, correia quebrada ou problema no motor da impressora. Nestas situações, as equipes de manutenção devem agir rapidamente para reparar ou substituir componentes danificados, minimizando o tempo de inatividade e evitando impacto nos prazos dos projetos.

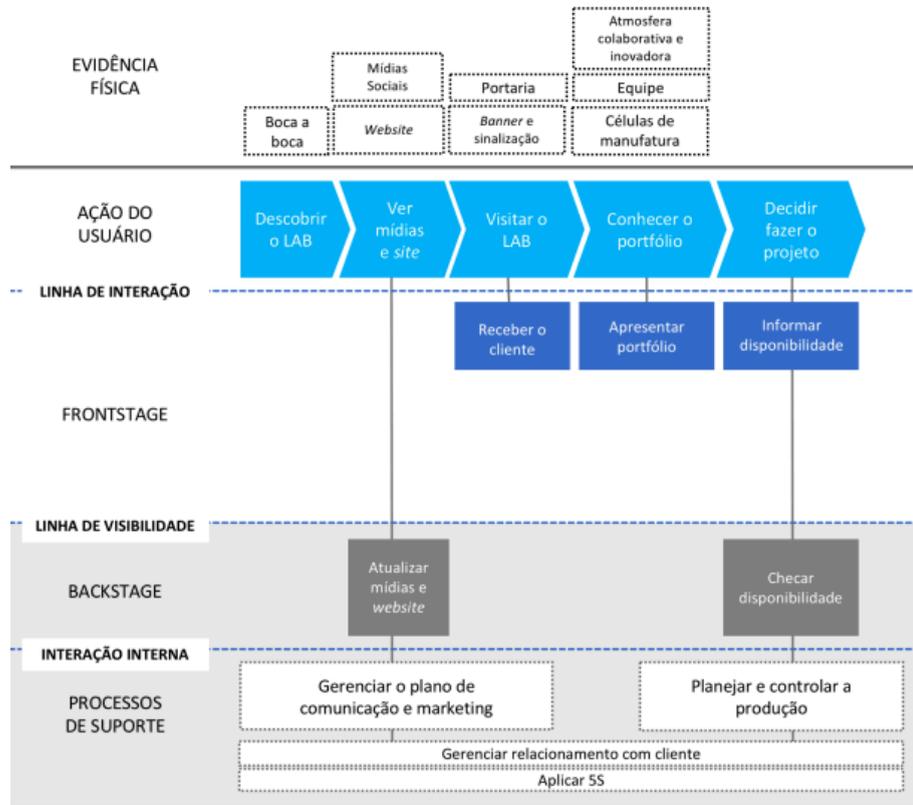
Figura 22: Função de manutenção dos equipamentos

<b>Nome da função</b>	<b>Realizar manutenção dos equipamentos</b>
Descrição	Preservação e o reparo das máquinas e ferramentas utilizadas no processo de prototipagem, especialmente as impressoras 3D. Inclui rotinas de verificação, limpeza, ajustes e reparos, tanto preventivos quanto corretivos.
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	
Saídas	Impressoras calibradas e operacionais
Pré-requisitos	Conhecimento técnico da equipe
Recursos	
Controlo	
Tempo	

Fonte: Autoria própria

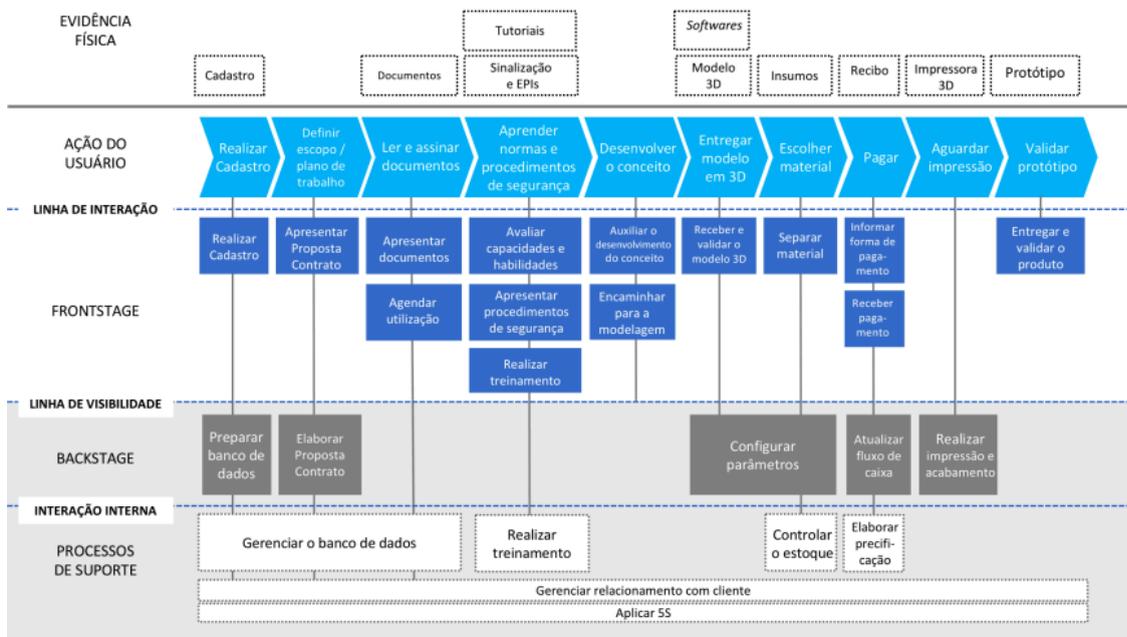
Ainda, após a construção do FRAM, comparou-se o resultado com o estudo desenvolvido por Zimmermann (2018) em que foi mapeado como deveria ser o processo de serviço do Laboratório Aberto de Brasília. Essa *blueprint* foi dividida nas etapas de: pré-serviço, serviço e pós-serviço, como é possível observar a seguir:

Figura 23: Blueprint do pré-serviço



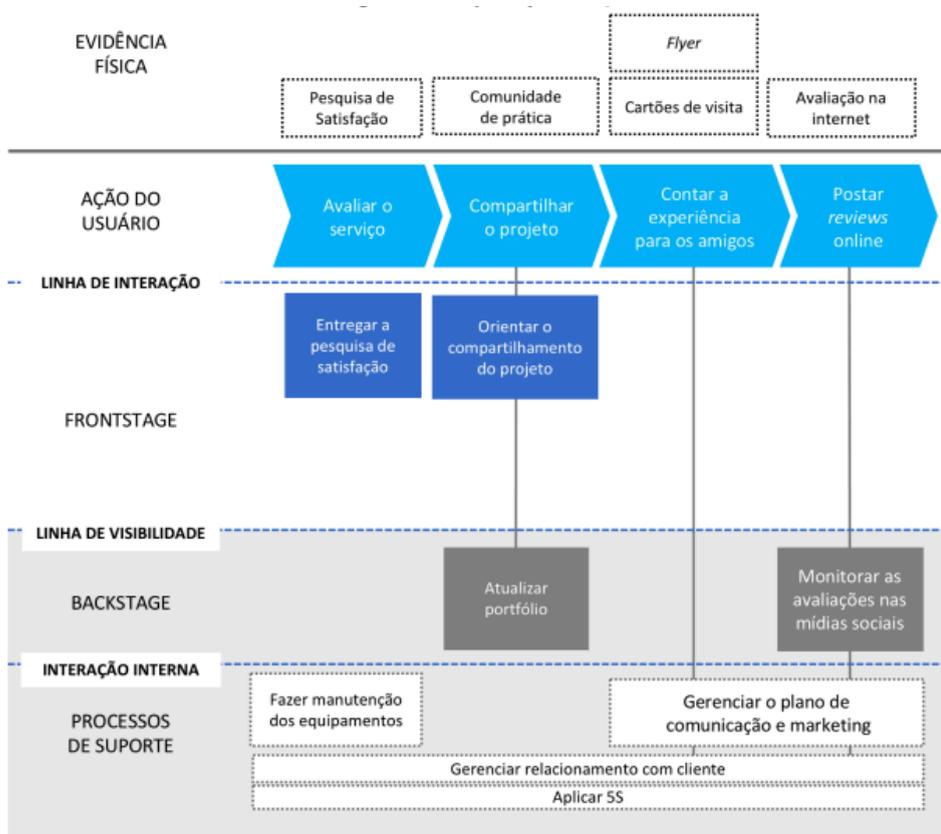
Fonte: Zimmermann, 2018

Figura 24: Blueprint do serviço



Fonte: Zimmermann, 2018

Figura 25: Blueprint do serviço



Fonte: Zimmermann, 2018

Com base nas figuras apresentadas, é possível perceber que as funções desenvolvidas no FRAM estão em notável harmonia com o que foi previsto na blueprint da proposição do Laboratório Aberto de Brasília (LAB), especialmente no que tange à etapa de serviço. Embora a representação e a finalidade dos métodos utilizados possam divergir naturalmente, é crucial reconhecer que o laboratório conseguiu cumprir todas as etapas delineadas em sua proposição inicial. Este feito é ainda mais impressionante quando consideramos que a estrutura inicial do LAB foi mantida intacta mesmo após seis anos de sua elaboração. A manutenção da estrutura inicial do LAB ao longo dos anos é um aspecto que merece destaque, especialmente em um ambiente caracterizado por uma alta rotatividade de membros e uma grande variabilidade do sistema. A capacidade do LAB de preservar suas diretrizes e objetivos originais, apesar das mudanças inevitáveis que ocorreram ao longo do tempo, demonstra uma resiliência significativa e uma adaptação eficaz às circunstâncias mutáveis. Além disso, a coerência entre as funções desenvolvidas no FRAM e a blueprint do LAB sugere que o laboratório conseguiu integrar de maneira eficiente os princípios teóricos e práticos da metodologia.

Em conclusão, o FRAM aplicado ao processo de prototipagem no Laboratório Aberto de Brasília permite uma visão ampla e detalhada das interações entre as diferentes funções do sistema. O FRAM ajuda a identificar a variabilidade presente nas operações diárias e a entender como as funções de suporte interagem com as funções principais. Durante as entrevistas, foi informado que, mesmo que o projeto seja desenvolvido todo corretamente, há a possibilidade do cliente afirmar que diverge do seu objetivo. De forma análoga, é possível que exista alguma falha no projeto, mas que isso atenda aos requisitos do cliente. Sendo assim, ao analisar o sistema como um todo, percebe-se que o sucesso de um projeto de prototipagem depende não apenas da execução perfeita de cada função isolada, mas principalmente da interdependência entre elas. As funções são influenciadas por fatores técnicos, operacionais e humanos, e a variabilidade no desempenho de uma função pode afetar significativamente outras funções. Com base nessa modelagem e as informações coletadas com técnicos em etapas anteriores é possível propor melhorias para o sistema aumentar sua resiliência. Essas questões serão abordadas no próximo tópico.

#### 4.3. Proposição de melhorias

Todo SST está sujeito a falhas que podem comprometer a eficiência, a qualidade e a segurança das operações. Para otimizar o sistema de prototipagem de bens físicos, propõe-se uma série de melhorias com base nos conceitos de Safety I e Safety II. Essas melhorias são orientadas tanto pela necessidade de reduzir vulnerabilidades estruturais quanto de reforçar a resiliência do laboratório em situações de variabilidade e falhas inesperadas.

Conforme explicado anteriormente, é possível analisar cada função dentro do software de construção do FRAM selecionando-a e identificando quais outras funções ela influencia. Essas conexões são destacadas em roxo. Por exemplo, a função "Levantar requisitos prévios" impacta quase todas as funções do sistema, o que evidencia a necessidade de que seu output seja o mais preciso possível. Esta função recebe como input o diagnóstico feito pela equipe de gestão, mas é realizada pela equipe técnica. Isso revela uma potencial falha de comunicação entre essas funções. Além disso, caso haja uma mudança na equipe do projeto após essa etapa, não existe documentação da reunião de diagnóstico nem dos requisitos técnicos e funcionais levantados. Diante disso, sugere-se duas propostas de melhoria a partir dessa análise: a) **participação obrigatória de um membro da equipe técnica nas reuniões com o cliente**, para garantir contato direto e evitar falhas de comunicação ao longo do sistema; b)



**um plano de contingência** para situações como essas. Isso inclui a implementação de procedimentos operacionais que garantam o armazenamento de dados de impressão em tempo real. Assim, caso a energia seja restaurada, a impressão pode ser retomada do ponto em que foi interrompida, evitando perdas de material ou comprometer a qualidade do protótipo. Juntamente com o plano de contingência, sugere-se a **criação de protocolos de recuperação rápida** após cortes de energia, garantindo o reinício seguro das impressoras e a restauração dos parâmetros de impressão.

Adicionalmente, a **implementação de sistemas de autoajuste e ajuste dinâmico** é indicada para casos em que a calibração incorreta seja detectada durante a impressão. Esses sistemas permitem que o equipamento realize ajustes automáticos ou alerte o operador sobre o problema, utilizando sensores integrados para medir e ajustar os parâmetros de operação conforme a impressão avança.

Ainda, quanto as validações realizadas ao longo do sistema, recomenda-se que haja uma **capacitação sobre validação ao longo do onboarding e nas sessões de reciclagem** para, caso os técnicos precisem validar um projeto, saibam quais critérios devem procurar, além de fazer parte da capacitação dos membros da gestão do laboratório. Ademais, indica-se a **implementação de uma revisão por pares** antes do início da impressão é altamente recomendada. Essa prática acontece de forma informal em alguns projetos, mas os técnicos relataram que agrega muito à solução final, além de conseguirem identificar pontos de melhoria que passariam despercebidos. Um segundo operador ou engenheiro especializado deve validar o modelo e a configuração da máquina para identificar possíveis problemas técnicos, prevenindo falhas que possam afetar o resultado final. Essa solução combinada com a anterior contribui para validações mais robustas e reduz a probabilidade de imprimir um protótipo com erros. Em conjunto com isso, sugere-se adotar uma **avaliação formal** do aluno, para entender se possui habilidades suficientes para ingressar em projetos com clientes e mapear seus pontos fortes e fracos dentro do laboratório. Essa etapa pode ser útil inclusive para a alocação de equipes de forma mais efetiva.

Por fim, quanto às validações com o cliente, sugere-se que seja acrescentada uma etapa de **validação da modelagem com o cliente**. Isso minimiza as chances de que uma peça seja feita de maneira equivocada e otimiza eventuais modificações necessárias. Além disso, a **criação de um protótipo preliminar**, como uma pré-impressão em pequena escala, reduz o

risco de falhas durante a produção completa, principalmente em produtos que sejam muito grandes.

Nesse sentido, é possível construir um quadro-resumo separado com todas as propostas de melhoria elencadas segmentando cada uma delas em práticas referentes à Safety I e práticas referentes à Safety II.

Tabela 4: Quadro-Resumo de propostas de melhoria

Safety I	Safety II
Participação obrigatória com um membro da equipe	Documentar as variações para aprendizado contínuo para análises futuras
Documentação do que foi acordado com o cliente e dos requisitos prévios realizados	Instalação de fontes de alimentação ininterrupta (no-breaks)
Capacitação sobre validação ao longo do onboarding e nas sessões de reciclagem	Estabelecimento de um plano de contingência
Implementação de uma revisão por pares	Criação de protocolos de recuperação rápida
Avaliação formal do aluno	Implementação de sistemas de autoajuste e ajuste dinâmico
Validação da modelagem com o cliente	
Criação de um protótipo preliminar	

Fonte: Autoria própria

Em conclusão, a adoção de melhorias baseadas nos conceitos de Safety I e Safety II visa aumentar a eficiência e resiliência do sistema de prototipagem. Essas ações podem transformar falhas em oportunidades de aprendizado e tornar uma operação mais segura e eficiente.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo abordou sistemas sócio-técnicos complexos (SSTs), destacando as dificuldades associadas à previsibilidade e controle nesses sistemas. A evolução das abordagens de segurança, com destaque para os conceitos de Safety I e Safety II, foi analisada, evidenciando a necessidade de uma perspectiva proativa e sistêmica, como a Engenharia de Resiliência, para lidar com a complexidade e variabilidade de tais sistemas.

O trabalho apresentou a aplicação do Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM) no Laboratório Aberto de Brasília (LAB), com o objetivo de auxiliar na construção

de propostas de melhorias desenvolvidas com o objetivo de aumentar a resiliência do sistema de prototipagem de bens físicos, com consequente melhora da qualidade, produtividade, segurança e confiabilidade do sistema. A sistemática proposta revelou-se adequada para ambientes colaborativos e de alta variabilidade, como o Laboratório Aberto de Brasília (LAB).

Todos os métodos e abordagens utilizados neste trabalho foram apresentados e conceituados no Capítulo 2. A sistemática foi formalizada no Capítulo 3 e aplicada em um estudo de caso no Capítulo 4, no qual foram propostas melhorias para o sistema de prototipagem do LAB. Assim, com base nas considerações finais, conclui-se que o trabalho atingiu seu principal objetivo. Os resultados mostram que a integração entre Safety I e Safety II, aliada ao uso do FRAM, possibilita uma análise mais abrangente e eficaz dos riscos e da resiliência operacional em sistemas complexos. Isso reforça a importância da adaptabilidade e do monitoramento contínuo em cenários de incerteza. Por fim, o trabalho cumpre seu objetivo de aprimorar a resiliência de um SST com o uso de uma abordagem de Safety II.

Caso surjam novas pesquisas sobre a mesma temática, sugere-se, como lições aprendidas do presente estudo, a realização de um período de imersão do contexto a ser explorado para que seja possível uma ambientação da problemática e a definição da melhor etapa a ser analisada. Além disso, é ideal escolher uma amostra significativa da população a ser avaliada para que isso não traga nenhum tipo de viés para a análise, além de que todas as entrevistas sejam gravadas para uma posterior transcrição detalhada. Outro ponto relevante, é reservar um período do projeto para levantar as propostas de melhoria e retornar com os entrevistados ou outras pessoas envolvidas no mesmo contexto, para validar se de fato fazem sentido para aquele sistema já que existem poucos referenciais teóricos para embasar melhorias para esse tipo de sistema. Subsidiariamente, a construção de um mecanismo de feedback contínuo com os participantes pode auxiliar a abordagem de pesquisa em tempo real, permitindo que eles forneçam suas percepções e sugestões à medida que o estudo progride, o que pode ajudar a identificar e corrigir problemas metodológicos, garantir que as perguntas de pesquisa permaneçam relevantes e que os dados coletados sejam de alta qualidade. Em caso de sistemas com mais funções e especificidades, utilizar ferramentas avançadas de análise de dados pode ser extremamente benéfico para processar e interpretar as informações coletadas durante o estudo. Ferramentas como software de análise estatística, aprendizado de máquina e visualização de dados podem aumentar a precisão dos resultados e

revelar padrões ou insights que não seriam evidentes através de métodos tradicionais. Isso permite uma análise mais profunda e detalhada, ajudando a identificar variáveis críticas e relações complexas dentro do sistema estudado. Por fim, seria interessante levantar as métricas que serviriam de base para a avaliação do aumento ou diminuição da resiliência do sistema para embasar futuras pesquisas que coloquem essas propostas em prática.

Como aspecto positivo, resta a realização de entrevistas semi estruturadas para entendimento da percepção dos atores envolvidos no sistema, pois permite que se aprofunde mais na temática e descubra fatores antes imprevisíveis que afetam o sistema como um todo. Ainda, a construção do modelo do FRAM se torna mais fluida com o apoio de um especialista na metodologia, pois ajuda a traduzir as percepções coletadas no contexto de entrevistas em funções e variabilidades do sistema. Vale aprofundar também, mesmo que em contextos completamente diferentes, a leitura de estudos de caso na mesma temática, para que se familiarize com as possibilidades dentro da engenharia de resiliência por ser um assunto recente e que necessita de esforço do pesquisador para elaborar propostas que possuam uma abordagem de Safety II.

Essas recomendações e práticas sugeridas formam um conjunto robusto de diretrizes para a condução de pesquisas futuras, garantindo que sejam mais precisas, relevantes e aplicáveis ao contexto dos sistemas estudados.

## ANEXO A – TRANSCRIÇÃO DA ENTREVISTA 1

A primeira entrevista foi realizada com um membro da gestão do laboratório, aluno do 11º semestre do curso de Engenharia de Produção. Ele explicou que a etapa de prototipagem é bastante ampla e varia conforme o tipo de projeto. Existem diferentes perfis de clientes: alguns trazem a modelagem pronta e apenas solicitam a fabricação do produto; outros buscam melhorias em produtos existentes utilizando manufatura aditiva; há também clientes que chegam com uma ideia e solicitam que a equipe desenvolva o projeto, modele e imprima a solução; e, por fim, alguns clientes apenas pedem a modelagem da solução, pois já possuem uma impressora 3D ou por outros motivos.

Ele detalhou que a gestão do laboratório realiza reuniões com os clientes para entender os requisitos dos projetos, baseando-se nas condições de uso do produto. Informações-chave, como a necessidade de resistência a determinadas temperaturas, a finalidade de uso e a necessidade de encaixes, são buscadas nessa fase. Destacou que muitos clientes mudam de ideia ao longo do projeto, e a gestão facilita a comunicação entre o laboratório e o cliente.

Sobre o tempo estimado para o projeto, mencionado no orçamento enviado ao cliente após a reunião, ele explicou que é uma estimativa fornecida pelo operador. A gestão também é responsável pela alocação dos membros da equipe, considerando a disponibilidade, o interesse pelo assunto e a experiência com o escopo do projeto. Além disso, a gestão acompanha os projetos e realiza duas validações: uma na finalização da modelagem para garantir que esteja alinhada com o que o cliente descreveu, e outra após a fabricação para um controle de qualidade da impressão.

Ele mencionou que, semestralmente, são realizadas reuniões de reciclagem para que os alunos aprimorem seus conhecimentos, e mensalmente ocorrem reuniões sobre os projetos em andamento para manter todos atualizados. Havia uma reunião semanal com o mesmo propósito, mas essa reunião não estava acontecendo.

Os novos membros entram como voluntários, trabalhando 8 horas semanais, e após aproximadamente 6 meses de capacitação, tornam-se bolsistas e podem trabalhar 20 horas semanais no laboratório. Quando questionado sobre as principais falhas no sistema, ele apontou que um grande volume de projetos pode sobrecarregar os membros, exigindo ajuda

em algumas etapas, como validações. Para evitar conflitos de interesse, a regra "Quem fez não valida" é seguida, mas não há outros direcionamentos específicos.

## ANEXO B – TRANSCRIÇÃO DA ENTREVISTA 2

A segunda entrevista foi realizada com um aluno do 4º semestre de Design de Produto, que foi membro do laboratório e, desde 2022, está na DUNA. Ele explicou que a DUNA é uma spin-off do LAB, com foco principal em brindes e demandas específicas, enquanto o LAB concentra-se mais em projetos de engenharia e desenvolvimento. O entrevistado esteve envolvido em cerca de 30 projetos no LAB e em 5 a 10 projetos na DUNA.

Ele mencionou que, em algumas ocasiões, o técnico participa das conversas com o cliente, o que proporciona uma compreensão mais detalhada das necessidades do projeto. Os principais materiais utilizados em conjunto com as peças impressas são madeira, acrílico e sistemas eletrônicos. O uso de mock-ups é frequente quando há pontos críticos no projeto, como necessidades específicas de encaixe, resistência ou funções complexas. Os mock-ups são usados para validar conceitos e garantir que os requisitos do projeto sejam atendidos, podendo ser impressas partes específicas ou o produto completo. Eles também servem como base para o treinamento de novos membros da equipe. Embora a solução possa não estar totalmente correta, o desenvolvimento de um mock-up pode ajudar no aprendizado do aluno, o que pode levar a um maior consumo de material e recursos por parte da equipe mais nova. Para encontrar soluções, o entrevistado busca inspiração no Google ou se baseia em projetos anteriores quando possível. Antes de iniciar a modelagem, ele faz esboços no papel para entender a melhor abordagem para o problema, embora não saiba se esse é um comportamento padrão.

Sobre as principais dificuldades, ele mencionou que há uma falta de entendimento entre técnicos e clientes, especialmente quando o técnico não participa das reuniões. Também destacou que a documentação do projeto poderia fornecer mais informações, especialmente na fase de desenvolvimento do produto, para facilitar em caso de eventuais mudanças na equipe. Outra dificuldade é prever erros de usuário, o que pode tornar os resultados mais imprevisíveis. Ele não acredita que um grande volume de projetos por técnico afete o sistema e os controles, mas reconhece que prazos curtos podem impactar a qualidade e o acabamento do trabalho. Quando um prazo curto é previsto desde o início, ele é alinhado com o cliente para definir expectativas do resultado final.

Ele também mencionou que os técnicos, às vezes, se ajudam para validar soluções, o que considera vantajoso, mas não há um treinamento formal para isso. Por fim, confirmou a estrutura de treinamentos existente no LAB, que pode durar menos de 6 meses dependendo da evolução e experiência prévia do aluno. No entanto, não há uma avaliação formal para testar o conhecimento dos alunos, o que pode resultar em defasagens em certos aspectos.

### ANEXO C – TRANSCRIÇÃO DA ENTREVISTA 3

Essa entrevista foi realizada como uma técnica atual do Laboratório Aberto de Brasília e que é aluna do 9º semestre de Engenharia Mecânica. Ela confirmou os tipos de projeto existentes no LAB e explicou que o uso de *mock-ups* é mais frequente em projetos que possuem a etapa de desenvolvimento do produto.

Ela mencionou que mudanças na equipe podem ser complicadas e podem ocorrer por diversos motivos, como a saída de membros, a descoberta de uma nova solução que exige um conhecimento específico ou a necessidade de realocar alguém para um projeto diferente. No geral, a documentação é completa, e o compartilhamento das modelagens ajuda a entender melhor o contexto do projeto.

Sobre a definição do cronograma, ela explicou que é feito com base na percepção do operador, mas inclui uma margem de erro para maior flexibilidade (aproximadamente 15%, embora ela não tenha certeza exata). Quanto ao treinamento dos novos membros, nem todos passam por projetos internos; alguns podem ser substituídos por etapas mais controladas dentro de projetos com clientes. O prazo estipulado para o treinamento é de 6 meses, podendo ser menor dependendo do aluno.

Quando questionada sobre as principais falhas do sistema, ela destacou os erros de impressão, que podem ser causados por uma série de fatores, como falta de luz, erros na calibração do equipamento, falhas na validação técnica e o não cumprimento de requisitos do cliente. Ela também comentou que a presença dos técnicos nas reuniões com os clientes ajuda a entender melhor o contexto e a esclarecer dúvidas, resultando em um direcionamento mais claro para o projeto.

## ANEXO D – TRANSCRIÇÃO DA ENTREVISTA 4

A quarta entrevista foi realizada com uma ex-membra da gestão do LAB, que é aluna do 12º semestre de Engenharia de Produção. Ela ingressou no LAB em abril de 2023 e permaneceu até março de 2024, período em que esteve envolvida em mais de 50 projetos, embora não atuasse diretamente no desenvolvimento. Suas principais responsabilidades incluíam a atribuição de equipes para cada projeto, organização dos prazos de entrega, acompanhamento do progresso dos projetos, organização da produção (determinando a quantidade de peças a serem impressas, o número de impressoras necessárias e o tempo de execução), reserva de equipamentos e verificação de estoques.

Ela confirmou a existência de quatro tipos de projetos no LAB, que se dividem em projetos de serviço ou de apoio, frequentemente prestados para disciplinas universitárias, como PSP6. O laboratório realiza as impressões e, em geral, envia fotos do andamento ao cliente ou o convida a visitar o laboratório. A gestão também é responsável por comunicar o status do projeto e inspecionar a qualidade das peças impressas, decidindo pela aprovação ou reprovação.

Ela mencionou que, dependendo do projeto e da equipe, podem ser impressas peças para validar etapas ou realizar testes, o que varia de acordo com as necessidades específicas do projeto. Essa etapa de validação pode ser destinada a outras pessoas, caso haja uma demanda muito grande e diz que quem está envolvido no projeto não pode realizar essa validação

## ANEXO E – RELATÓRIO DO FRAM

### Prototipagem LAB

<b>Nome da função</b>	Diagnosticar o projeto
Descrição	Reunião agendada com o cliente com a gestão do lado e, opcionalmente, um técnico, para entender as expectativas do cliente com o projetos e o tipo de projeto que está mais adequado as suas necessidades
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	
Saídas	Diagnostico com definição do tipo de projeto
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

<b>Nome da função</b>	Levantar requisitos prévios
Descrição	Com base na reunião de diagnóstico, definir quais são os requisitos técnicos e funcionais do produto e entender se existe alguma solicitação específica do cliente que possa gerar adaptações no projeto
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Diagnostico com definição do tipo de projeto
Saídas	Lista de requisitos técnicos e funcionais
Pré-requisitos	Conhecimento tecnico da equipe
Recursos	Equipe definida
Controlo	
Tempo	

<b>Nome da função</b>	Modelar protótipo
Descrição	Modelagem e fatiamento da versão de protótipo a ser apresentada para o cliente
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Lista de requisitos técnicos e funcionais Mock ups realizados e solução validada
Saídas	Modelo 3D digital do produto
Pré-requisitos	Conhecimento tecnico da equipe
Recursos	Equipe definida Energia Eletrica
Controlo	Validação pela equipe tecnica Validação pela gestão do LAB
Tempo	Cronograma do projeto

## Prototipagem LAB

<b>Nome da função</b>	Validar modelo tecnicamente
<b>Descrição</b>	Etapa feita pelo supervisor técnico que ira identificar se a proposta de solução e a modelagem estão tecnicamente bem desenvolvidas
<b>Aspecto</b>	Descrição do Aspecto
<b>Entradas</b>	Modelo 3D digital do produto
<b>Saídas</b>	Validação pela equipe tecnica
<b>Pré-requisitos</b>	Conhecimento tecnico da equipe
<b>Recursos</b>	
<b>Controlo</b>	
<b>Tempo</b>	Cronograma do projeto

<b>Nome da função</b>	Fabricar protótipo
<b>Descrição</b>	Envolve várias etapas técnicas que são essenciais para garantir que o protótipo final atenda aos requisitos de qualidade e funcionalidade. Esses passos incluem a calibração da impressora 3D, o carregamento do arquivo de impressão, e o pós-processamento do protótipo após a impressão.
<b>Aspecto</b>	Descrição do Aspecto
<b>Entradas</b>	Modelo 3D digital do produto
<b>Saídas</b>	Prototipo fisico
<b>Pré-requisitos</b>	Impressoras calibradas e operacionais Conhecimento tecnico da equipe
<b>Recursos</b>	Energia Eletrica Materiais de impressão seleccionados Equipe definida
<b>Controlo</b>	Validação pela gestão do LAB
<b>Tempo</b>	Cronograma do projeto

<b>Nome da função</b>	Validar prototipo
<b>Descrição</b>	Apresentar o protótipo físico ao cliente para entender se atende suas expectativas
<b>Aspecto</b>	Descrição do Aspecto
<b>Entradas</b>	Prototipo fisico Lista de requisitos técnicos e funcionais
<b>Saídas</b>	Prototipo fisico validado
<b>Pré-requisitos</b>	Conhecimento tecnico da equipe
<b>Recursos</b>	
<b>Controlo</b>	
<b>Tempo</b>	Cronograma do projeto

## Prototipagem LAB

<b>Nome da função</b>	Selecionar materiais para impressão
Descrição	Definição de qual material é o mais ideal para a impressão do produto com base nos requisitos levantados
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Lista de requisitos técnicos e funcionais
Saídas	Materiais de impressão selecionados
Pré-requisitos	Conhecimento técnico da equipe
Recursos	Equipe definida
Controlo	Validação pela equipe técnica
	Validação pela gestão do LAB
Tempo	Cronograma do projeto

<b>Nome da função</b>	Capacitar membros
Descrição	Capacitação para novos membros para atender clientes, passando pelas etapas de treinamentos e projetos internos, ou reciclagem dos alunos
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	
Saídas	Conhecimento técnico da equipe
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

<b>Nome da função</b>	Definir cronograma do projeto
Descrição	Definir duração das etapas do projeto para serem definidas no orçamento enviado ao cliente. É flexível e baseado exclusivamente na experiência prévia da equipe com outros projetos acrescidos de uma margem de erro.
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Diagnostico com definição do tipo de projeto
	Lista de requisitos técnicos e funcionais
Saídas	Cronograma do projeto
Pré-requisitos	Conhecimento técnico da equipe
Recursos	Equipe definida
Controlo	
Tempo	

## Prototipagem LAB

<b>Nome da função</b>	<b>Realizar manutenção dos equipamentos</b>
Descrição	Preservação e o reparo das máquinas e ferramentas utilizadas no processo de prototipagem, especialmente as impressoras 3D. Inclui rotinas de verificação, limpeza, ajustes e reparos, tanto preventivos quanto corretivos.
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	
Saídas	Impressoras calibradas e operacionais
Pré-requisitos	Conhecimento técnico da equipe
Recursos	
Controlo	
Tempo	

<b>Nome da função</b>	<b>Fornecer Energia Elétrica</b>
Descrição	Energia para funcionamento dos computadores, impressoras e demais equipamentos eletrônicos
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	
Saídas	Energia Elétrica
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

<b>Nome da função</b>	<b>Realizar controle de qualidade</b>
Descrição	Etapa realizada pela equipe de gestão para garantir que a solução está de acordo com as expectativas do cliente e que não possui nenhuma falha visual e/ou estrutural
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Modelo 3D digital do produto Prototipo físico Lista de requisitos técnicos e funcionais
Saídas	Validação pela gestão do LAB
Pré-requisitos	Conhecimento técnico da equipe
Recursos	
Controlo	
Tempo	

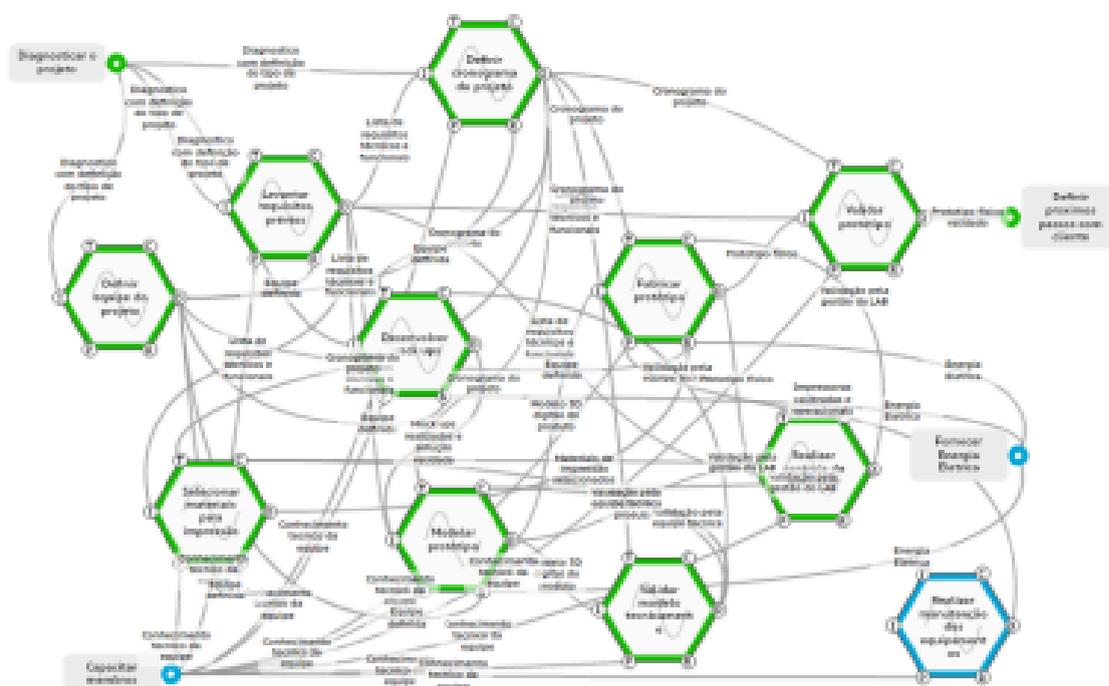
## Prototipagem LAB

<b>Nome da função</b>	Definir próximos passos com cliente
Descrição	Entregar o protótipo definitivo e formalizar a conclusão do projeto, tendo a possibilidade de realizar outro prototipo caso o cliente queira fazer um ajuste ou imprimir produto em escala
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Prototipo fisico validado
Saídas	
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

<b>Nome da função</b>	Definir equipe do projeto
Descrição	Definir o tamanho da equipe com base no diagnóstico e quais membros do LAB desenvolverão o projeto. Escolha feita com base em: disponibilidade, interesse pela temática e conhecimento técnico sobre o tema
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Diagnostico com definição do tipo de projeto
Saídas	Equipe definida
Pré-requisitos	
Recursos	
Controlo	
Tempo	

<b>Nome da função</b>	Desenvolver mock ups
Descrição	Objetivo de validar algum conceito específico da solução proposta,. Usada principalmente quando o projeto apresenta algum ponto de atenção, sendo os principais: encaixes, resistência do produto e funções específicas do sistema que a equipe nao está tão familiarizada. Etapa facultativa e decidida pela propria equipe
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição do Aspecto</b>
Entradas	Diagnostico com definição do tipo de projeto Lista de requisitos técnicos e funcionais
Saídas	Mock ups realizados e solução validada
Pré-requisitos	Conhecimento tecnico da equipe
Recursos	Equipe definida Energia Eletrica
Controlo	Validação pela equipe tecnica
Tempo	Cronograma do projeto

## Prototipagem LAB





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERY, S.; TEPE, S.; BORYS, D. **An evaluation of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) as a practical risk assessment tool within a manufacturing environment.** Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World, p. 1493–1501, 2018.
- ANDERSON, J. E. et al. **Implementing resilience engineering for healthcare quality improvement using the CARE model: a feasibility study protocol.** Pilot Feasibility Studies, v. 2, p. 61, 2016.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo.** Lisboa: Edições 70, 2011.
- BRAUN, V.; CLARKE, V. **Using thematic analysis in psychology.** Qualitative Research in Psychology, v. 3, n. 2, p. 77-101, 2006.
- CHU, Y. **Investigation of Supply Chain Risk Utilising Cynefin Model.** 4th International Conference on Operations and Supply Chain Management, p. 848–854, 2010.
- CONSTANTINO, F.; PATRIARCA, R.; DI GRAVIO, G. **A Monte Carlo evolution of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to assess performance variability in complex systems.** Safety science, v. 91, p. 49–60, jan. 2017.
- CRESWELL, J. W. **Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches.** Thousand Oaks: Sage Publications, 2014.
- DA MOTA ALVES, J. B. **Teoria Geral de Sistemas.**
- DISCONZI, C.; SAURIN, T. **Design for resilient performance: concept and principles.** Applied er, v. 101, 2022.
- DYKSTRA, J.; ORR, S. **Acting in the unknown: the cynefin framework for managing cybersecurity risk in dynamic decision making.** IEEE, 2016.
- EUROCONTROL. **A White Paper on Resilience Engineering for ATM.** Disponível em: <<http://dx.doi.org/https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-07/white-paper-resilience-2009.pdf>>.
- GIBBS, G. **Analyzing qualitative data.** London: Sage Publications, 2007.
- GREENHALGH, T.; PAPOUTSI, C. **Studying complexity in health services research: desperately seeking an overdue paradigm shift.** BMC Medicine, 2018.
- HAM, D.-H. **Safety-II and Resilience Engineering in a Nutshell: An Introductory Guide to Their Concepts and Methods.** Safety and Health at Work, v. 12, n. 1, p. 10–19, mar. 2021.

- HAMERSKI, D. C. et al. **PRODUCTION PLANNING AND CONTROL AS-IMAGINED AND AS-DONE: THE GAP AT THE LOOK-AHEAD LEVEL.** 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, p. 767–776, 2021.
- HERRERA, I. A.; WOLTJER, R. **Comparing a multi-linear (STEP) and systemic (FRAM) method for accident analysis.** Reliability Engineering & System Safety, v. 95, n. 12, p. 1269–1275, 2010.
- HOLLNAGEL, E. **FRAM: The Functional Resonance Analysis Method — Modelling Complex Socio-technical Systems.** 2012.
- HOLLNAGEL, E.; NEMETH, C. P. **From resilience engineering to resilient performance: advancing resilient performance.** Cham: Springer Verlag, 2022.
- HOLLNAGEL, E. **Safety-I and Safety-II: the past and future of safety management**
- HOLLNAGEL, E. **Resilience Engineering: A New Understanding of Safety.** Journal of the Ergonomics Society of Korea, v. 35, p. 185–191, 2016.
- HOLLNAGEL, E. **Safety-II in practice: developing the resilience potentials.** 2018.
- HOLLNAGEL, E.; HOUNSGAARD, J.; COLLIGAN, L. **FRAM – the Functional Resonance Analysis Method – a handbook for the practical use of the method.** Centre for Quality, 2014.
- HOLLNAGEL, E.; TVEITEN, C.; ALBRECHTSEN, E.. **Resilience Engineering and Integrated Operations in the Petroleum Industry.** 2010.
- HOLLNAGEL, E.; WOODS, D. D.; LEVESON, N. **Resilience engineering: concepts and precepts.** 2006.
- LEVESON, N. **A new accident model for engineering safer systems.** Safety Science, v. 42, p. 237-270, 2004.
- LINCOLN, Y. S.; GUBA, E. G. **Naturalistic inquiry.** Thousand Oaks: Sage Publications, 1985.
- MILES, M. B.; HUBERMAN, A. M. **Qualitative data analysis: An expanded sourcebook.** 2. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 1994.
- NEMETH, C.; HERRERA, I. **Building change: Resilience Engineering after ten years.** Reliability En, 2015.
- NEMETH, C.; HOLLNAGEL, E. **Becoming Resilient.** Farnham, England: Ashgate Publishing, 2014.
- NEMETH, C.; HOLLNAGEL, E.; DEKKER, S. **Resilience Engineering Perspectives, Volume 2: Preparation and Restoration.** Farnham, England: Ashgate Publishing, 2009.

PATRIARCA, R. et al. **FRAM for Systemic Accident Analysis: A Matrix Representation of Functional Resonance**. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, v. 25, n. 1, 2018a.

PATRIARCA, R. et al. **Resilience engineering: current status of the research and future challenges**. Safety Science, v. 102, p. 79–100, 2018

PATRIARCA, R. et al. **Framing the FRAM: A literature review on the functional resonance analysis method**. Safety Science, v. 129, 2020.

PATTERSON, M.; DEUTSCH, E. **Safety-I, Safety-II and resilience engineering**. Current Problems Pediatric Adolescent Health Care, v. 45, p. 382–389, 2015.

PRIORI, F. R. **ANÁLISE DOS MÉTODOS A3, FRAM E RCA APLICADOS PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS EM AMBIENTE HOSPITALAR**. 2017.

PROVANA, D. J. et al. **Safety II professionals: How resilience engineering can transform safety practice**. Reliability Engineering and System Safety, v. 195, 2019.

RASMUSSEN, J. **Risk management in a dynamic society: A modelling problem**. Safety Science, v. 27, n. 2, p. 183-213, 1997.

RIGHI, A. W.; SAURIN, T. A. **Complex socio-technical systems: Characterization and management guidelines**. Applied Ergonomics, v. 50, p. 19–30, 2015.

STAKE, R. E. **The art of case study research**. Thousand Oaks: Sage Publications, 1995.

SULTANA, S.; HAUGEN, S. **An extended FRAM method to check the adequacy of safety barriers and to assess the safety of a socio-technical system**. Safety science, v. 157, 2023.

TRESFON, J. et al. **Aligning work-as-imagined and work-as-done using FRAM on a hospital ward: a roadmap**. BMJ Open Quality, v. 11, n. 4, 2022.

UNDERWOOD, P.; WATERSON, P. **Systems thinking, the Swiss cheese model and accident analysis: a comparative systemic analysis of the Grayrigg train derailment using the ATSB, Accimap and STAMP models**. Accident Analysis Prevention, v. 68, p. 75–94, 2014.

WACHS, P., SAURIN, T.A., RIGHI, A.W., WEARS, R.L. **Resilience skills as emergent phenomena: a study of emergency departments in Brazil and the United States**. Appl. Ergon. 56, 227–237, 2016.

WESTRUM, R. A typology of resilience situations. In: HOLLNAGEL, E.; WOODS, D. D.; LEVESON, N. (Eds.). **Resilience engineering: Concepts and precepts**. Aldershot, UK: Ashgate, 2006. p. 55-65.

WOODS, D. D. **Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering**. Reliability Engineering, 2015.

WOODS, D. D.; HOLLNAGEL, E. **Prologue: Resilience Engineering Concepts**. 2006.

YIN, R. K. **Case study research and applications: design and methods.** Thousand Oaks: Sage Publications, 2018.

YOUSEFI, A.; HERNANDEZ, M.; PEÑA, V. **Systemic accident analysis models: A comparison study between AcciMap, FRAM, and STAMP.** 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/prs.12002>>.

ZIMMERMANN, A. **Proposição de ambiente de aprendizagem ativa: Laboratório Aberto de Brasília.** 2018