

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

Samara Herrmann

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS VIA
MBSE**

Santa Maria, RS
2022

Samara Herrmann

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS VIA MBSE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Aeroespacial**. Defesa realizada por videoconferência.

ORIENTADOR: Prof. Eduardo Escobar Bürger

Santa Maria, RS
2022

Samara Herrmann

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS VIA MBSE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Aeroespacial**.

Aprovado em 30 de agosto de 2022:

Eduardo Escobar Bürger, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Christopher Shneider Cerqueira, Dr. (ITA)

Mario Fernando De Mello, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

RESUMO

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS VIA MBSE

AUTORA: Samara Herrmann

ORIENTADOR: Eduardo Escobar Bürger

Buscando se adequar às frequentes mudanças nas demandas de mercado, os sistemas de manufatura evoluem e se mostram cada vez mais complexos, exibindo um elevado número de interações e maior disponibilidade de dados. Nesse sentido, o presente trabalho propõe a utilização de MBSE (Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos, do inglês *Model Based Systems Engineering*) como metodologia de análise para abordagem de processos industriais. Analisa-se a aplicabilidade de MBSE na prática industrial e propõem-se um método de modelagem visando identificar os indicadores de desempenho de produção. São implementadas duas situações, a primeira de uma perspectiva global de um processo de manufatura e a segunda a um fluxo de fabricação específico. Conclui-se que a modelagem de um processo industrial via MBSE apresenta potencial positivo e pequenos pontos a serem contornados.

Palavras-chave: MBSE. Manufatura. Melhoria Contínua. Processo Industrial.

ABSTRACT

ANALYSIS METHODOLOGY FOR INDUSTRIAL PROCESSES VIA MBSE

AUTHOR: Samara Herrmann
ADVISOR: Eduardo Escobar Bürger

Seeking to adapt the frequent changes in market demands, manufacturing systems evolve and became increasingly complex, displaying a high number of interactions and greater availability of data. The present work proposes the use of MBSE as an analysis methodology to approach industrial processes. It seeks to analyze the applicability of MBSE (Model Based Systems Engineering) in industrial practice and propose a modeling method to identify production performance indicators. Two situations are implemented, the first from a global perspective of a manufacturing process and the second from a specific manufacturing flow. In conclusion, the modeling of an industrial process via MBSE has positive potential and small points to be circumvented.

Keywords: MBSE. Manufacturing. Continuous Improvement. Industrial Process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama das etapas de aplicação da metodologia MBSE por meio do método Arcadia	18
Figura 4.1 – Esquema geral do processo de MBSE via Arcadia para modelagem de um processo industrial	23
Figura 5.1 – Diagrama de Missão e Capacidades [MCB]	26
Figura 5.2 – Diagrama de Arquitetura do Sistema [SAB]	28
Figura 5.3 – Diagrama de Arquitetura Física [PAB]	29
Figura 5.4 – Diagrama de Arquitetura KPIs [SAB]	30
Figura 5.5 – Diagrama de Cenários [ES] para Capacidade Custo	31
Figura 5.6 – Diagrama de Arquitetura do Processo Inicial - Contrafluxo	32
Figura 5.7 – Diagrama de Arquitetura do Processo Otimizado - Fluxo Lean	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais diferenças entre os sistemas de produção enxuta e em massa	12
Tabela 2.2 – Indicadores Chave de Produção (KPIs)	14
Tabela 3.1 – Compilação dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica.	21
Tabela 4.1 – Procedimento de aplicação do MBSE via Arcadia em um processo industrial.....	24
Tabela 4.2 – Correlações entre termos do Capella e do processo industrial.....	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVOS	8
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	SISTEMAS DE PRODUÇÃO	10
2.1.1	Sistema de Produção Enxuta	11
2.1.2	Indicadores de Desempenho	13
2.2	ENGENHARIA DE SISTEMAS	14
2.2.1	Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos	15
2.2.1.1	<i>Arcadia e Capella</i>	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4	METODOLOGIA	23
5	IMPLEMENTAÇÃO	26
5.1	IDENTIFICAÇÃO DAS CAPACIDADES DO SISTEMA	26
5.2	IDENTIFICAÇÃO DE ATORES, FUNÇÕES, CONEXÕES E RESPONSABILIDADES	27
5.3	IDENTIFICAÇÃO DE SUBSISTEMAS	29
5.4	IDENTIFICAÇÃO DE CAMINHOS CRÍTICOS	30
5.5	APLICAÇÃO ESPECÍFICA	31
6	DISCUSSÕES	34
7	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
	APÊNDICE A – DIAGRAMA DE ARQUITETURA DO SISTEMA [SAB]	40
	APÊNDICE B – DIAGRAMA DE ARQUITETURA FÍSICA [PAB]	41
	APÊNDICE C – DIAGRAMA DE ARQUITETURA KPIS [SAB]	42

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação têm se mostrado cada vez mais complexos e adaptativos visto a necessidade de adequação às demandas de mercado, que estão em constante mudança. Trabalhos recentes indicam um esforço para redução de custo, melhoria da qualidade e entrega ao cliente o mais rápido possível (AKUNDI; LOPEZ; TSENG, 2021). As premissas da manufatura enxuta, que representa o sistema de gerenciamento utilizado pela indústria, são baseadas em redução de perdas e melhoria contínua. Duas atuações cuja eficácia depende diretamente do nível de compreensão do processo de produção. Nesse sentido, a integração de diferentes áreas de conhecimento, diferentes *stakeholders* e as próprias interdependências do processo sugerem a necessidade de uma metodologia eficiente para o gerenciamento de complexidade (WOMACK; JONES; ROOS, 2007).

A Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) apresenta potencial funcionalidade para lidar com essa complexidade. De acordo com SEBoK Editorial Board (2021), a engenharia de sistemas é uma abordagem que busca abranger todas as disciplinas envolvidas no desenvolvimento de um sistema, visando entender as necessidades dos *stakeholders* e determinar soluções considerando o sistema como um todo, desde sua concepção até o seu descarte. A consideração de todo o ciclo de vida do sistema permite conhecer sua complexidade e determinar as expertises necessárias para prever e contornar as adversidades, mantendo uma comunicação assertiva entre a rede de pessoas envolvidas (BRUSA, 2018). Assim, considerando a natureza multidisciplinar e de concentração de informações da MBSE junto à complexidade de um sistema de manufatura, o estudo relacionado a união desses dois conceitos se mostra pertinente.

A análise da revisão bibliográfica demonstra uma gama de estudos que utilizam a engenharia de sistemas na concepção de processos industriais. No entanto, verificou-se uma lacuna em relação à otimização de processos já implementados. Assim, sugere-se que o uso do MBSE pode beneficiar a análise e controle de processos industriais.

1.1 OBJETIVOS

A Pergunta principal que representa o objetivo do trabalho é:

- Qual o benefício do uso do MBSE na análise de processos industriais?

A pergunta acima leva a outras questões para análise prévia, que fundamentam os objetivos específicos do trabalho:

- I Quais os parâmetros de melhoria de um processo de produção?

- II Como modelar um processo via ferramenta de MBSE?
- III Como a modelagem pode auxiliar na melhoria contínua do processo?
- IV Como enxergar os parâmetros de melhoria no modelo?

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em sete capítulos, sendo o Capítulo 1 (Introdução) referente à delimitação de escopo e exposição dos objetivos.

O Capítulo 2 (Fundamentação Teórica) apresenta um breve histórico acerca da evolução dos processos produtivos, seguindo para uma contextualização da manufatura enxuta e determinando os principais indicadores de desempenho de um processo de manufatura. Também, aborda os conceitos referentes a MBSE e apresentação da linguagem e ferramenta utilizadas na modelagem.

O Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica) expõe algumas pesquisas existentes em relação ao tema abordado e apresenta onde o presente trabalho encaixa sua contribuição.

O Capítulo 4 (Metodologia) apresenta o método empregado na aplicação de MBSE a um processo industrial.

O Capítulo 5 (Implementação) demonstra a aplicação do método a um processo produtivo analisado de uma perspectiva global e a uma célula de produção específica.

O Capítulo 6 (Discussões) aponta as contribuições do método proposto em relação ao esperado pelo Capítulo 2, às pesquisas existentes do Capítulo 3 e à aplicação desenvolvida no Capítulo 5.

O Capítulo 7 (Conclusão) conclui o atendimento aos objetivos propostos e apresenta os potenciais e fragilidades da metodologia utilizada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo apresenta conceitos relacionados aos assuntos principais do trabalho, que são MBSE e processos produtivos. Dessa forma, inicia-se com os fundamentos de sistemas de produção, passando pelos pilares da engenharia de sistemas.

2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

De acordo com Slack, Chambers e Johnston (2007), um sistema de produção pode ser definido como uma parte da organização a qual produz produtos e serviços para clientes externos à organização. Um processo de produção possui como entradas o recurso a ser transformado, como materiais ou informações, e o recurso transformador, como máquinas ou pessoas, e o sistema de produção engloba as entradas, saídas e o processo de transformação em si.

Os sistemas de produção atravessaram notáveis transformações ao longo dos séculos até atingir a forma conhecida no presente. Ainda assim, o sistema de produção aplicado atualmente nas indústrias não é um modelo estático, uma vez que suas modificações se dão em função das frequentes mudanças nas demandas do mercado. Seja no âmbito de personalização de produtos, requisitos de qualidade ou de prazo, é inegável a necessidade de adaptação e inserção de novas tecnologias, por parte das indústrias, em seus sistemas produtivos (WOMACK; JONES; ROOS, 2007).

Anterior ao conhecido sistema de produção em massa, difundido por Henry Ford, a fabricação era constituída essencialmente pela produção artesanal. Como reitera Corrêa e Corrêa (2017), nesse sistema a produção caracterizava-se pela falta de especialização em determinadas funções, com a confecção sendo realizada do início ao fim por um único trabalhador e a ausência de uma sistemática de controle de qualidade. Fatos esses que resultavam em um sistema produtivo de elevado custo e baixo volume de produção, que, apesar de ineficiente, atendia as demandas da época.

No início do século XX, aspirando a democratização do automóvel, objetivo que não era viável considerando as limitações da produção artesanal, Henry Ford resolveu a questão introduzindo inovações no sistema de produção (MORGAN; LIKER, 2020) O sistema de produção em massa adotado pela Ford mostrou-se, em grande parte, oposto ao seu antecessor. A produção em massa diferenciava-se pela especialização em um posto de trabalho, ferramentas dedicadas a uma função (eliminando a necessidade de *setup* a cada operação) e padronização do produto. Características essas que levaram a um sistema de produção mais eficiente, com custos de produção reduzidos (mesma quantidade de mão de obra para maior saída de produto), maior qualidade do produto e

menores prazos de entrega.

Segundo Womack, Jones e Roos (2007), foram sucessivas adaptações do sistema, ao longo de anos, que levaram Henry Ford a atingir seu objetivo. Aplicando seu novo sistema produtivo a linhas de montagem, o primeiro passo constituiu-se de aproximar do trabalhador as peças e ferramentas necessárias para a montagem, eliminando a necessidade de deslocamento. Após, em meados de 1908, introduziu o método em que cada trabalhador realizava uma única tarefa durante todo o ciclo de montagem, o que permitiu desenvolver expertise e, conseqüentemente, rapidez na tarefa. Ainda, em 1913, visando eliminar o deslocamento do trabalhador entre as linhas de montagem, elaborou a "linha de montagem móvel", onde o produto se deslocava continuamente, e não mais o montador.

Apesar da excepcional lógica utilizada por Henry Ford para otimização do sistema de produção, baseando-se em observar seu processo e identificar oportunidades de melhoria, uma nova conversão foi proposta (WOMACK; JONES; ROOS, 2007).

2.1.1 Sistema de Produção Enxuta

O sistema de produção enxuta (LM, do inglês *Lean Manufacturing*), inicialmente conhecido como Sistema Toyota de Produção, foi concebido em meados de 1950 incentivado por uma crise econômica enfrentada pela Toyota e uma visita à fábrica da Ford. A Toyota havia recém chegado ao ramo automotivo quando, com a eclosão da Segunda Guerra, a companhia dedicou sua produção a caminhões militares, produzindo, assim, uma quantidade insignificante de carros e por meio de técnicas de produção artesanal (OHNO, 1988).

Com uma economia arrasada pela guerra e uma empresa em crise, era clara a necessidade da Toyota em otimizar seu sistema de produção. Foi nesse contexto que Eiji Toyoda visitou a fábrica da Ford e investigou o sistema de produção em massa, concluindo, junto ao seu chefe de produção Taiichi Ohno, que o notável sistema empregado no Ocidente não funcionaria no Japão. Visto que, de encontro às premissas do sistema de produção em massa, o mercado japonês demandava elevada variedade de veículos para uma limitada fração de consumidores e, com as leis trabalhistas ganhando força, a mão de obra não mais aceitava ser facilmente substituída ou eliminada. Ao mesmo tempo, a economia arrasada não permitia investimentos em tecnologia e enfrentava a aspiração das diversas fábricas de automóveis ocidentais em se estabelecer no Japão (WOMACK; JONES; ROOS, 2007).

Buscando solucionar os desafios do mercado japonês, a Toyota apostou em equipamentos flexíveis e desenvolveu a técnica de troca rápida de ferramenta (SMED, do inglês *Single Minute Exchange of Die*). O que permitiu sustentar a variedade dos produtos e pequenos lotes de produção, reduzindo custos associados ao estoque, por exemplo, aumento de capacidade tanto de equipamentos, mão de obra ou expansão de locais físicos

para armazenamento (SHINGO, 1909).

Ao contrário do sistema de produção em massa, que tinha como objetivo a qualidade no cliente final e não parar a linha de produção o que levava aos defeitos somente serem descobertos após a conclusão e então reparados, o sistema Toyota buscava encontrar os defeitos o mais cedo possível e não permitir a continuação da produção em cima de um produto defeituoso (OHNO, 1988).

Nesse sentido, a Tabela 2.1 sintetiza as principais inovações trazidas pelo sistema de produção enxuta em relação à produção em massa.

Tabela 2.1 – Principais diferenças entre os sistemas de produção enxuta e em massa

Produção em Massa	Produção Enxuta
Equipamentos dedicados a determinadas funções	Equipamentos flexíveis com troca rápida de ferramenta
Lotes de produção grande gerando elevado estoque	Lotes de produção pequenos de acordo com a demanda
Posto de trabalho dedicado, trabalho repetitivo e elevada carga	Postos de trabalho flexíveis e comprometimento com objetivos da empresa
Problemas de qualidade detectados somente no final da linha levando à propagação de defeitos	Problemas de qualidade detectados e resolvidos imediatamente
Problemas de produção nas mãos de gerentes	Envolvimento do chão de fábrica na resolução de problemas e melhorias
Elevado tempo e custo para alterar especificações dos produtos	Diversidade de modelos

Fonte: Adaptado de Womack, Jones e Roos (2007).

Na rotina de aplicação do sistema de produção enxuta, as indústrias se empenham na redução perdas do processo produtivo e na administração de ciclos de melhoria contínua. Dessa forma, destacam-se os princípios da produção enxuta, que devem servir como base na sua implementação e manutenção (SHINGO, 1909).

- Especificar o valor na visão do cliente;
- Mapear o fluxo de valor;
- Fluxo contínuo;

- Produção puxada;
- Buscar zero defeitos.

2.1.2 Indicadores de Desempenho

Com o objetivo de manter os princípios da produção enxuta, adotam-se formas de mensurar o processo produtivo. Na indústria de manufatura, essa medição é feita através dos Indicadores Chave de Desempenho (KPI, do inglês *Key Performance Indicators*), o que possibilita identificar e eliminar perdas do processo e, conseqüentemente, atender aos clientes no prazo, com um produto de qualidade e um custo competitivo. Fundamentando-se em Caldeira (2012) e Khan e Bilal (2019), a Tabela 2.2 apresenta alguns desses indicadores, que serão referenciados no decorrer do trabalho.

Tabela 2.2 – Indicadores Chave de Produção (KPIs)

Indicador	Descrição
Custo de Produção	Custo médio por unidade produzida.
Tempo de Inatividade	Tempo em que a máquina deixou de produzir devido à parada não programada.
Eficácia Global do Equipamento (OEE)	Relação entre a capacidade teórica e a capacidade real de produção.
<i>Jobs Per Hour</i> (JPH)	Quantidade produzida em determinado período de tempo.
<i>Lead Time</i> (LT)	Tempo total para saída de um produto, calculado desde a realização do pedido até sua entrega.
Performance	Relação entre o tempo de ciclo teórico e real.
Qualidade	Relação entre quantidade produzida e quantidade com defeito.
Retrabalho	Quantidade de produto retrabalhado.
<i>Takt Time</i> (TT)	Calculado pela divisão entre o tempo disponível para produção e a demanda do cliente, ou seja, define a frequência que o processo precisa entregar um produto para atender a demanda.
Tempo Médio de Reparo (MTTR)	Tempo médio para reparo de um equipamento em caso de parada não programada.
Tempo Médio entre Falhas (MTBF)	Tempo médio entre ocorrências de paradas não programadas.

Fonte: Autor.

2.2 ENGENHARIA DE SISTEMAS

De acordo com INCOSE (2015), podemos definir um sistema como um conjunto de elementos que interagem entre si e são organizados de modo a atingir um objetivo pré estabelecido. A aplicação de uma metodologia científica ou empírica no desenvolvimento desse sistema visando chegar no objetivo determinado nos leva a definição de Engenharia

de Sistemas (SE, do inglês *System Engineering*): uma forma de pensar de maneira lógica e estruturada para levar um sistema ao estado desejado.

Esse modo lógico e estruturado de pensar produzido pela engenharia de sistemas consiste em considerar, desde a concepção do projeto, todo o ciclo de vida de um sistema, todas as disciplinas envolvidas em seu desenvolvimento e, sobretudo, as necessidades do usuário. Nesse sentido, a SE concebe um processo estruturado que acompanha o projeto desde a concepção até a operação do sistema, integrando todas as especialidades em um esforço conjunto (NASA, 2016).

Baseando-se em Blanchard e Fabrycky (2014) pode-se identificar algumas características de um sistema bem sucedido. Primeiramente, um sistema deve possuir requisitos funcionais que permitam atingir seu objetivo pré-estabelecido e que atendam as necessidades do usuário. Esses requisitos funcionais devem ser elaborados considerando todo o ciclo de vida do sistema e uma distribuição equilibrada de recursos. Para atender seu objetivo o sistema conta com diversos subsistemas interagindo a todo momento, respondendo as suas interações internas e externas, levando em consideração o ambiente em que está inserido.

Holt e Perry (2018) evidenciam que a fim de otimizar um processo de desenvolvimento de um sistema é necessário superar as barreiras de complexidade, conhecimento e comunicação, as quais dificultam uma abordagem eficiente do problema. Nessa perspectiva, a SE fornece métodos e ferramentas para a elaboração de um sistema em sua fase inicial, levando a uma profunda análise de como cada decisão poderá impactar o sistema em todo o seu ciclo de vida, ou seja, na sua concepção, na sua fase de utilização, no seu processo de manutenção ou mesmo no seu descarte.

Assim, a SE possibilita uma distribuição mais acertada de recursos financeiros, de tempo e de pessoas ao longo do andamento do projeto. Visto que, sistemas e processos considerados críticos ou mais suscetíveis a adversidades já foram mapeados e registrados por um time multidisciplinar, integrando diferentes áreas de conhecimento por meio de uma comunicação assertiva já na fase de concepção do sistema (BLANCHARD; FABRYCKY, 2014).

2.2.1 Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos

INCOSE (2015) afirma que a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE, do inglês *Model Based Systems Engineering*) formaliza a aplicação da SE através do uso de modelos. Baseando-se em diversos significados encontrados para a terminologia "modelo", nesse contexto, ela pode ser definida como uma construção teórica simplificada de um sistema. Assim, um modelo permite suportar as etapas da SE ao longo de todas as fases do projeto com o objetivo de apresentar uma visão macro do sistema e suas intera-

ções.

A utilização de modelos permite centralizar as informações essenciais em um único modelo acessível a todo o time de projeto, indo de encontro a tradicional abordagem baseada em documentos. Nessa as informações relacionadas a requisitos, projeto, análises e testes estão dispersas em diferentes arquivos, tornando complexo relacionar os requisitos de cliente com as decisões de projeto. Dessa forma, a rastreabilidade de cada etapa do projeto e o impacto de cada solução é quase inexistente, influenciando em possíveis problemas de qualidade, custo e prazo (FRIEDENTHAL; MOORE; STEINER, 2014).

No mesmo contexto, Estefan (2008) apresenta a MBSE como um conjunto de processos, métodos e ferramentas que orientam o gerenciamento de projetos, atuando como um procedimento para se chegar a determinado objetivo. Procedimento, o qual, abrange uma visão multidisciplinar e que considera todo o ciclo de vida do sistema desde o seu conceito, permitindo prever adversidades e contorná-las logo no início do projeto. O que tende a gerar menos falhas nas etapas subsequentes e garantir a eficiência do projeto.

Mcdermott et al. (2020) apresenta razões para integrar a metodologia de SE no gerenciamento de projeto:

- I Redução de tempo e custo, conseqüentemente, aumento da eficiência;
- II Maior rastreabilidade de informações e processos;
- III Melhor entendimento do sistema como um todo;
- IV Melhor comunicação e troca de informações, conseqüentemente, acesso à informação facilitado;
- V Redução de erros ao longo do desenvolvimento.

Pode-se dizer que a MBSE opera como um modelo no gerenciamento de projetos que permite levar um sistema ao estado desejado. Fornecendo processos, métodos e ferramentas aplicadas a todas as etapas de vida do sistema. Sempre aplicado por um time multidisciplinar, refletindo as perspectivas e necessidades de todas as expertises envolvidas, levando a uma redução de perdas visto que identifica adversidades já no início do planejamento, facilitando a comunicação entre os envolvidos no projeto e aumentando a produtividade por meio da possibilidade de reutilização de modelos (ESTEFAN, 2008).

Portanto, visando facilitar a aplicação de MBSE, existem diversas linguagens, métodos e ferramentas disponíveis no mercado. Para o presente trabalho, optou-se pela utilização do *software* Capella, o qual apresenta como principal benefício a união da ferramenta, linguagem e método em uma única solução. Ainda, apresenta a vantagem de ser um *software* gratuito e de código aberto, com o qual a autora já possui experiência prévia.

2.2.1.1 Arcadia e Capella

A ferramenta Capella, juntamente ao método Arcadia, foram inicialmente desenvolvidos por uma das grandes empresas do setor aeroespacial, Thales Alenia Space, e atualmente de responsabilidade da Empresa Francesa OBEO. O método Arcadia se caracteriza como uma linguagem que possibilita a utilização de um procedimento baseado em modelos. Enquanto a ferramenta Capella viabiliza a aplicação do método por meio de um ambiente de engenharia com interface amigável, sendo esse *software* uma ferramenta gratuita e de código aberto.

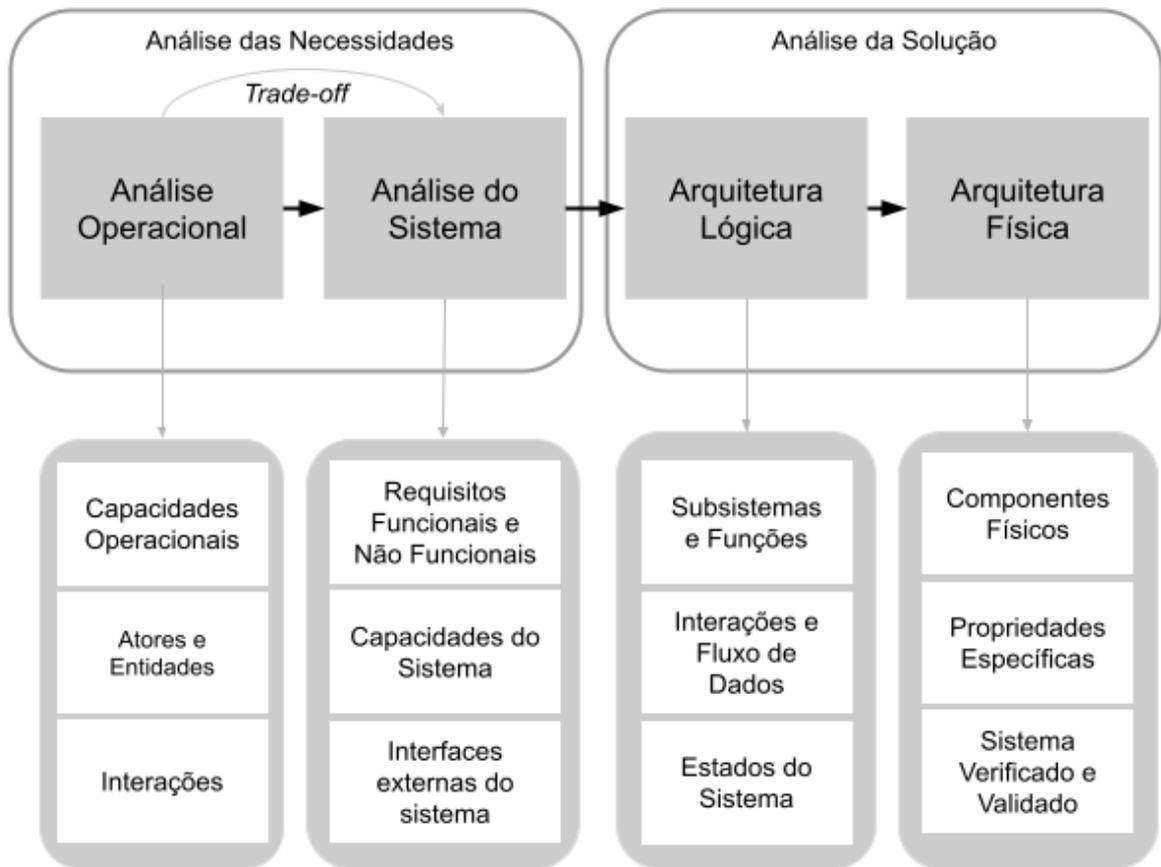
De acordo com Roques (2018), o método Arcadia junto a ferramenta Capella permitem "definir, analisar, projetar e validar arquiteturas de sistema de hardware e de *software*". Possibilitando uma colaboração eficiente entre todo o fluxo de interessados e a validação das soluções frente aos requisitos, otimizando as análises de *trade-off*.

A aplicação do método Arcadia se fundamenta em quatro etapas, conforme Fig. 2.1. Nessa, exibe-se um diagrama representando as etapas de aplicação do método Arcadia, sendo este composto de duas grandes partes: análise das necessidades e análise da solução. Quando são avaliadas as necessidades consideram-se duas perspectivas, as demandas do cliente (Análise Operacional) e as necessidades do sistema para efetivar essas demandas (Análise do Sistema). Já no momento em que se avalia a solução, leva-se em conta quais as funções fundamentais para o sistema cumprir as necessidades especificadas (Arquitetura Lógica) e como esse sistema será construído para desempenhar essas funções (Arquitetura Física). Verificando-se constantemente a relação de compromisso entre as necessidades do cliente e o custo de transformar essas demandas em capacidades do sistema (Thales, 2022).

Conforme Voirin (2012), a primeira etapa, Análise Operacional, tem como propósito definir as missões e capacidades operacionais do ponto de vista do usuário do sistema. Nessa etapa não é feita referência ao sistema, mas sim identificados os atores que devem interagir com o sistema, suas demandas, atividades e interações. Já na perspectiva da Análise do Sistema, se objetiva identificar as funções e comportamentos esperados do sistema para atender as necessidades do usuário, não levando em consideração, nesse momento, soluções de projeto, apenas as necessidades do sistema. Assim, por meio de uma análise funcional dessas necessidades, ao fim dessa etapa, tem-se consolidado os requisitos funcionais e não funcionais do sistema.

Passando para as etapas voltadas à solução, a Arquitetura Lógica inicia o direcionamento ao projeto do sistema. A partir de uma análise funcional interna, que determina o comportamento do sistema, caracterizam-se os principais componentes necessários para realização das funções estabelecidas. Assim, pode-se definir a arquitetura mais acertada da perspectiva das relações de compromisso. Por fim, a etapa de Arquitetura Física concretiza a arquitetura escolhida por meio do detalhamento acerca da construção de seus subsistemas. Nessa etapa são integradas as questões tecnológicas e os recursos neces-

Figura 2.1 – Diagrama das etapas de aplicação da metodologia MBSE por meio do método Arcadia



Fonte: Autor.

sários para efetivação do sistema, com especificações de desenvolvimento e integração, sendo assim, justificada a arquitetura física escolhida (ROQUES, 2018).

Nessa perspectiva, de acordo com Thales (2022), o *software* Capella orienta a aplicação do método por meio de uma interface guiada, a qual se inicia com a Análise Operacional e decorre pelas etapas até a Arquitetura Física. Em cada fase tem-se a possibilidade de criação de diferentes diagramas, sendo automática a transição de informações entre as etapas e completamente flexível em relação às representações gráficas. Ou seja, de acordo com o propósito da modelagem do ponto de vista do usuário, pode-se escolher quais etapas aplicar à modelagem e quais diagramas utilizar em cada etapa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo visa apresentar o estado da arte em relação ao tema abordado, que correlaciona o uso de MBSE com sistemas de produção. Ao final, apresenta-se uma tabela resumo com as principais contribuições e a lacuna de pesquisa atribuída ao presente trabalho. A revisão foi feita fundamentando-se nos seguintes banco de dados: *IEEE Xplore*, *ScienceDirect* e *ResearchGate*.

Steimer, Fischer e Aurich (2017) sugerem a utilização de MBSE nas fases iniciais do sistema de planejamento de manufatura, objetivando uma melhor integração desse planejamento com o desenvolvimento de produto. Por meio da linguagem SysML desenvolvem quatro níveis de modelagem: definição do escopo e fronteiras do sistema de manufatura; especificação técnica do processo de manufatura; projeto e controle do sistema; e detalhamento dos subsistemas técnicos do processo. Os autores concluem que a abordagem MBSE-SysML oferece uma descrição formal e visual do sistema de manufatura, permitindo uma fácil interpretação por parte dos desenvolvedores. Também, permite a colaboração entre as diferentes disciplinas envolvidas no sistema e a reutilização de elementos durante o processo de projeção do sistema. Por outro lado, ressaltam a baixa aceitação por parte de engenheiros de processo de manufatura devido ao seu desvio de processos tradicionais, a dificuldade de modelagem devido a não existência de uma biblioteca de manufatura e a necessidade do alto nível de abstração uma vez que os elementos do modelo não representam as propriedades físicas reais do sistema de manufatura.

No mesmo contexto, Mandel et al. (2020) traz a abordagem de MBSE para descrever e investigar as interdependências entre o desenvolvimento de produto e a sua produção no ambiente da Indústria 4.0. Analisa quais informações são relevantes no contexto de desenvolvimento e produção de produto, como são conectadas e descreve abordagens de modelagem dessas informações por meio da linguagem SysML. Conclui que essa abordagem possui um efeito positivo no desenvolvimento integrado de processo e produto, permitindo que projetistas possam identificar as influências das soluções encontradas durante o desenvolvimento do produto no processo de produção. Permitindo que as decisões sejam mais acertadas e que o gerenciamento de riscos do processo de produção seja iniciado ainda no desenvolvimento do produto.

Khalil et al. (2020) focam seu trabalho no desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão para tornar sistemas de manufatura existentes mais flexíveis às mudanças de mercado. Os autores utilizam MBSE via linguagem SysML como abordagem para desenvolvimento de um sistema genérico de "manufatura adaptável". Para esse fim, criam uma relação entre fontes de variação e o grupo em que causariam a necessidade de mudança, como exemplo, o atraso de entrega de um fornecedor acarreta na necessidade de adaptação em relação à entrega. Por fim, a abordagem proposta é aplicada em um estudo

de caso de produção de perfume, permitindo visualizar, por meio da modelagem, o fluxo de um distúrbio ao longo do sistema.

Chibane, Mhenni e Choley (2019) propõem a utilização de MBSE para análise de confiabilidade em uma linha de produção e seu produto, aplicando a linguagem SysML para modelar a estrutura e comportamento do sistema e os procedimentos de FMECA (Efeitos de Modos de Falha e Análise de Criticidade) e FTA (Árvore de Análise de Falhas) para análise de falhas. Os autores identificam as funções do processo e os pontos chave que podem levar a falhas no produto final, destacando que essa abordagem evidencia a relação entre falhas no processo de produção e falhas no produto. Finalizam afirmando que a modelagem permitiu a visualização global do sistema processo-produto, permitindo aos especialistas uma análise consistente de confiabilidade.

Mas et al. (2019) utilizam a MBSE para representar uma linha de montagem final de aeronaves, empregando a modelagem para representar a relação entre solução de projeto e sua consequente solução de manufatura. Da mesma forma, em Morales-Palma et al. (2018) apresenta a utilização de MBSE na definição de escopo de um sistema de fabricação específico, concluindo que a integração de diferentes perspectivas derivadas dos participantes do projeto permite a elaboração de um sistema mais robusto e de forma mais eficiente.

Brusa (2018) apresenta uma discussão acerca da integração de MBSE, Produção Enxuta (LM) e Manufatura Inteligente (SM). O autor demonstra que uma importante convergência entre os três sistemas acontece na necessidade, cada vez maior, de adaptação da produção para atender aos requisitos de clientes. Dessa forma, as ferramentas de produção enxuta trazem flexibilidade e, unidas à manufatura inteligente e sua potencial capacidade de adaptação, tornam os sistemas cada vez mais complexos, motivando a aplicação da MBSE no seu gerenciamento. Por fim, conclui que cada um dos três sistemas (LM, SM e MBSE) simboliza o lado de um triângulo equilátero, representando uma integração ideal para uma abordagem única visando projetar, produzir e entregar.

No mesmo sentido, Akundi, Lopez e Tseng (2021) identificam as principais temáticas e tendências da aplicação de MBSE no campo da engenharia de manufatura e de produção. Os autores compilam 471 artigos publicados nos últimos dez anos e apresentam as mudanças nas perspectivas da temática ao longo dos anos e as ferramentas de MBSE mais utilizadas. Concluem que a linguagem mais utilizada é o SysML e as ferramentas que mais se repetem são Modelica e Eclipse. Os artigos foram agrupados em seis grupos de palavras chave e, por meio da análise dos assuntos relacionados a cada grupo, percebeu-se que a maior parte dos artigos são fortemente ligados às fases de desenvolvimento de produto e às relações entre o processo de produção com o processo de desenvolvimento.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo das contribuições apresentadas no capítulo.

Tabela 3.1 – Compilação dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica.

Autor	Contribuição
Steimer, Fischer e Aurich (2017)	Utilização de MBSE por meio da linguagem SysML na concepção de um processo de manufatura.
Mandel et al. (2020)	Utilização de MBSE por meio da linguagem SysML no desenvolvimento integrado de processo e produto.
Khalil et al. (2020)	Utilização de MBSE por meio da linguagem SysML na análise de causa e efeito de uma perturbação no sistema de manufatura.
Chibane, Mhenni e Choley (2019)	Utilização de MBSE por meio da linguagem SysML na análise de relação entre falhas no processo de produção e falhas no produto final.
Mas et al. (2019)	Utilização de MBSE na correlação de solução de projeto versus solução de manufatura em uma linha de montagem final de aeronaves.
Morales-Palma et al. (2018)	Utilização de MBSE na definição de escopo para um sistema de fabricação de metal.
Brusa (2018)	Discussão acerca da união dos conceitos de MBSE, LM e SM nas necessidades de adaptação de um sistema de produção.
Akundi, Lopez e Tseng (2021)	Discussão acerca das tendências de aplicação da MBSE nos últimos dez anos.

Fonte: Autor.

Nota-se que a aplicação da MBSE em processos de manufatura já é uma prática bastante difundida, sendo objeto de análise de diversos autores. Na revisão apresentada, foram encontradas diversas perspectivas de modelagem, sendo recorrente a utilização de MBSE e linguagem SysML na concepção de um sistema de manufatura, sendo por meio de uma modelagem integrada ao desenvolvimento do produto ou na demanda de

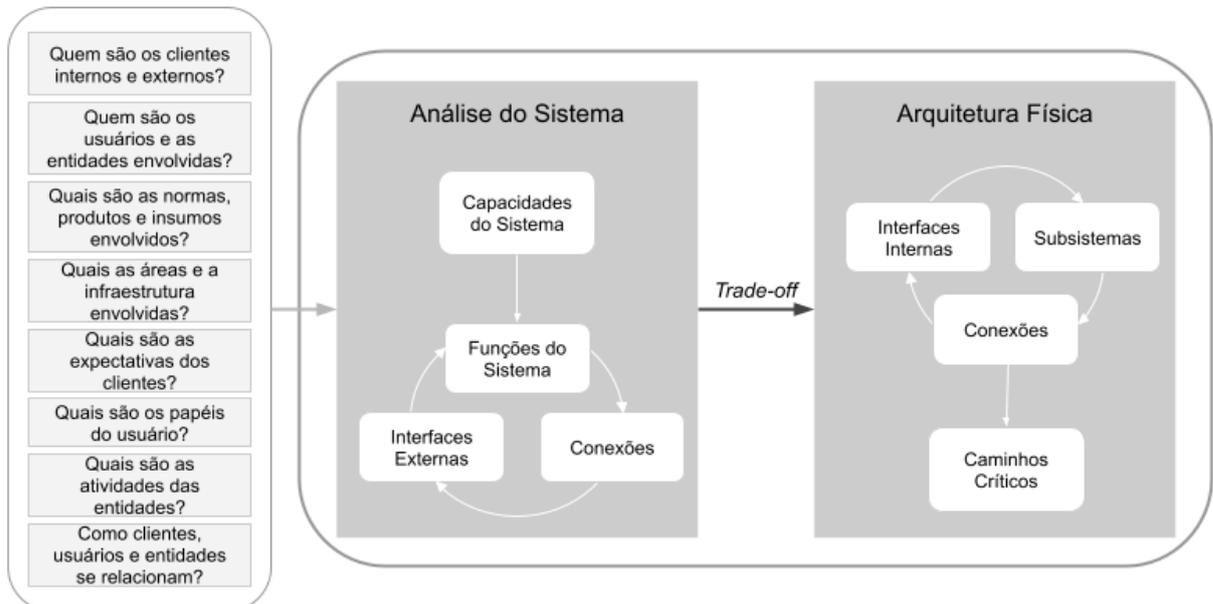
flexibilidade. Portanto, a autora propõe a utilização de MBSE na análise de um sistema de manufatura existente pela perspectiva de identificar parâmetros de produção (KPIs) com foco na otimização do processo produtivo, permitindo aos gestores a identificação e controle desses parâmetros e analisar o impacto de possíveis mudanças.

4 METODOLOGIA

Fundamentando-se no método Arcadia e nas características da ferramenta Capella, desenvolveu-se um procedimento orientando a modelagem de um processo industrial. Dessa forma, o presente capítulo apresentará o conceito geral do método e as correlações utilizadas na adaptação entre a linguagem da ferramenta e a linguagem do processo modelado.

A Fig. 4.1 exibe um roteiro generalizado do procedimento proposto para modelagem de um processo industrial via método Arcadia. Em analogia às etapas de aplicação do método, apresentadas na Seção 2.2.1.1, e à flexibilidade proveniente da ferramenta, o procedimento proposto se delimita na aplicação das etapas de Análise do Sistema (AS) e Arquitetura Física (AF). Referindo-se, na primeira etapa, às necessidades do sistema, suas funções e relacionamentos externos. E, na segunda etapa, ao refinamento em subsistemas, suas funções e interações internas, conduzindo à identificação de pontos críticos do sistema que afetam diretamente as capacidades determinadas inicialmente.

Figura 4.1 – Esquema geral do processo de MBSE via Arcadia para modelagem de um processo industrial



Fonte: Autor.

Um dos principais objetivos da modelagem é entregar respostas racionais a perguntas pré definidas (ROQUES, 2018). Dessa forma, no diagrama apresentado introduz-se alguns questionamentos que orientam a concepção do modelo, buscando instigar a consideração de todos os envolvidos, quais as suas demandas e atividades em relação ao sistema, e como esses atores, entidades, expectativas e papéis se relacionam. É impor-

tante salientar que, apesar de representarem um modo lógico de refinamento do sistema, o método não exige que todos os passos sejam aplicados ou mesmo, que sejam aplicados nessa ordem. No mesmo sentido, a profundidade da análise dependerá dos objetivos esperados com a modelagem.

Seguindo o esquema da Fig. 4.1, a Tabela 4.1 descreve cada etapa proposta.

Tabela 4.1 – Procedimento de aplicação do MBSE via Arcadia em um processo industrial.

Análise do Sistema	
1 Identificar as capacidades do sistema	Definir quais os objetivos e escopo do processo modelado na perspectiva de esclarecer o que se espera alcançar com a modelagem.
2* Identificar os atores e entidades envolvidas	Elencar todos os setores incluídos no processo - clientes externos, internos, usuários, divisões de suporte, fornecedores, insumos - sejam pessoas, objetos, documentos ou organizações. Nesse momento, é importante ter clareza em relação à primeira etapa para identificar atores e entidades adequados e necessários.
3* Identificar as funções necessárias	Identificar todas as atividades necessárias para que o sistema consiga cumprir as capacidades estabelecidas. Essas atividades podem ser de responsabilidade do próprio sistema ou de atores e entidades determinadas.
4* Identificar as conexões entre funções	Determinar os fatores de interdependência entre as funções, isto é, o que conecta uma função a outra. Seja um fluxo de dados, seja um gatilho, seja um objeto, existe algum fator que determina a relação.
5* Identificar as funções de cada ator ou entidade	Alocar as funções observadas para o ator ou entidade responsável pela sua execução. Algumas dessas funções serão designadas ao sistema.
Arquitetura Física	
6** Identificar os subsistemas	Refinar o sistema por meio da subdivisão em subsistemas, os quais podem ser representados por pessoas, objetos, setores. Essa subdivisão é concebida de forma a realocar as funções do sistema.
7 Identificar os caminhos críticos	Em concordância com as capacidades atribuídas ao sistema, distinguir os caminhos de interesse no panorama de determinar os pontos chave que afetam as competências e comportamentos esperados do sistema.
* As etapas 2, 3, 4 e 5 podem ser aplicadas de forma iterativa, podendo-se percorrer entre elas conforme necessidade. Por exemplo, ao alocar as funções percebe-se que faltam entidades para destinação de determinadas funções, nesse caso, pode-se, sem prejuízo, acrescentar atores ou entidades conforme necessidade.	
** Ao determinar os subsistemas pode-se crescer funções.	

Por fim, a Tabela 4.2 destaca algumas correlações efetuadas entre as terminologias do Capella e de um processo de manufatura.

Tabela 4.2 – Correlações entre termos do Capella e do processo industrial.

Capella	Processo Industrial
Funções do Sistema/Físicas	Atividades do processo de manufatura e das áreas de suporte ou etapas do processo de fabricação;
Sistema	Processo de Manufatura
Atores/Entidades	Áreas Suporte, Clientes e Fornecedores
<i>Functional Exchange</i>	Fluxo de dados, produto ou gatilho de ativação da função
<i>Functional Chains</i>	Percurso dos indicadores de produção ou de subprocessos relacionados ao foco da modelagem.

Fonte: Autor.

5 IMPLEMENTAÇÃO

O capítulo atual apresenta a aplicação da metodologia exposta no Capítulo 4 aliada aos conceitos apresentados no Capítulo 2. Dessa forma, está estruturado de modo que as Seções 5.1 a 5.4 representam cada etapa da metodologia proposta aplicada à modelagem de um processo industrial observado de uma perspectiva generalizada. Já a Seção 5.5 exemplifica a aplicação de modelagem a uma célula de produção específica.

Para efeito de esclarecimento, o termo "sistema", nas seguintes seções, refere-se ao "processo industrial". Todos os diagramas apresentados nesse capítulo foram construídos no *software open-source* Capella. Assim, a escolha dos diagramas utilizados em cada etapa foi arbitrária visto a flexibilidade ofertada pela ferramenta.

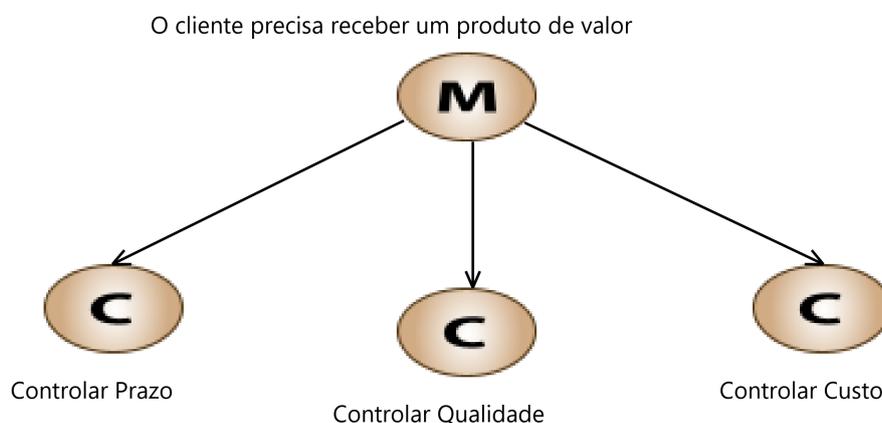
5.1 IDENTIFICAÇÃO DAS CAPACIDADES DO SISTEMA

Baseando-se nos princípios da Produção Enxuta, particularmente em relação à orientação do sistema à criação de valor para o cliente, definiu-se a missão do sistema como

- O cliente precisa receber um produto de valor.

No sistema em questão, o cliente é a principal parte interessada e representa o cliente final, o qual irá receber o produto acabado após processo de manufatura. Nesse sentido, a Figura 5.1 apresenta o Diagrama de Missão e Capacidades, no qual pode-se observar a missão (M) declarada, bem como as capacidades (C) do sistema associadas a essa missão.

Figura 5.1 – Diagrama de Missão e Capacidades [MCB]



Ligadas à missão, as capacidades necessárias ao sistema foram definidas como controlar prazo, controlar qualidade e controlar custo. Buscando analisar do ponto de vista do cliente, entendeu-se que a criação de valor está atrelada a três pontos essenciais, os quais são atendidos por meio do controle de parâmetros críticos.

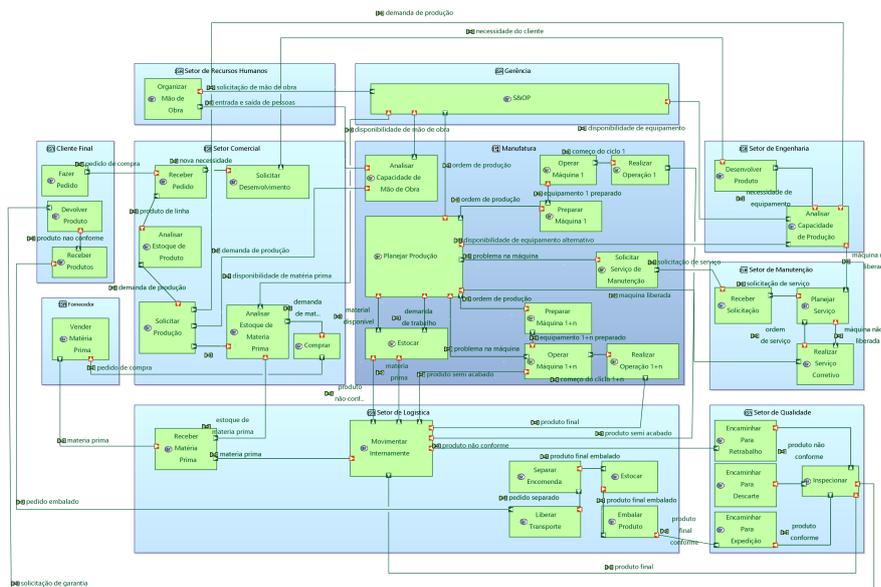
- Receber o produto dentro de um prazo que atenda suas demandas;
- Receber um produto que não apresente defeitos;
- Adquirir o produto por um valor monetário competitivo.

5.2 IDENTIFICAÇÃO DE ATORES, FUNÇÕES, CONEXÕES E RESPONSABILIDADES

Prosseguindo as etapas, conforme evidenciado na Tabela 4.1, é coerente a aplicação das etapas 2 a 5 por meio de um movimento pendular. Uma vez que, ao definir atores e entidades envolvidas, é plausível seguir na direção de determinar suas funções e, ao determinar uma função já pode-se identificar sua conexão com a função seguinte. O caminho contrário também é válido, assim sendo, caso se identifique uma função sem responsável por sua realização, é apropriado criar um novo ator ou uma nova entidade para aloca-la.

Partindo desse princípio, a Figura 5.2 representa o Diagrama de Arquitetura do Sistema, também disponível no Apêndice A. Nesse diagrama pode-se identificar o sistema modelado com as funções pertencentes a ele para desempenhar as capacidades determinadas. No mesmo sentido, verificam-se as entidades vinculadas e suas funções fundamentais para fornecer assistência ao sistema.

Figura 5.2 – Diagrama de Arquitetura do Sistema [SAB]



Fonte: Autor.

O bloco central visto Figura 5.2 representa o sistema, que no caso em questão, foi denominado Manufatura. Em torno do sistema pode-se observar as entidades, as quais foram definidas como os setores de suporte à manufatura, sendo criadas conforme necessidade de entradas e saídas do sistema.

O sistema Manufatura acomoda funções relacionadas ao planejamento de produção e ao processo de manufatura em si. Ele faz interface direta com os setores de Recursos Humanos, Comercial, Logística, Manutenção, Engenharia e Gerência, sendo cada um desses responsável por enviar algum tipo de dado essencial à operação do sistema.

O Setor Comercial, ao receber um pedido do cliente, disponibiliza à Manufatura a demanda de produção para que, junto às informações de entrada e saída de pessoas vinda do Setor de Recursos Humanos, possa analisar a necessidade de mão de obra para atendimento da demanda. Sendo essa informação repassada à Gerência que, ao compilar as informações no processo de SOP (Planejamento de Vendas e Operações), irá determinar a estratégia operacional. Revertendo essa informação à Manufatura como ordem de produção.

Com a informação refinada disponível, a Manufatura planeja a produção e ao receber do Setor de Logística a matéria prima, distribui as ordens de produção para os responsáveis. Os quais partem para preparação das máquinas (*setup*) e posterior operação, tendo como saída o produto final. Observa-se que a movimentação de matéria prima e do produto entre máquinas e setores é executada pelo Setor de Logística.

Após movimentação interna do produto final para o Setor de Qualidade, esse realiza a verificação do produto. Estando o produto conforme especificações, ele é liberado para o Setor de Logística realizar os procedimentos de expedição. Caso o produto apresente

defeitos, pode ser encaminhado para a Manufatura realizar o reparo, operação a qual será planejada pela produção e sairá juntamente às ordens de produção.

5.3 IDENTIFICAÇÃO DE SUBSISTEMAS

Conforme observado na Seção 5.2, no sistema Manufatura estão alocadas funções referentes ao planejamento da produção e à fabricação do produto. Nesse cenário, o diagrama da Figura 5.3 (Apêndice B), a Manufatura foi subdividida entre Planejamento e Produção, representando, respectivamente, os dois casos observados. O Planejamento apresenta dois subsistemas: um relacionado à mão de obra e outro relacionado às demandas de produção. A Produção é composta por três subsistemas: a própria mão de obra, as máquinas e o estoque intermediário.

Figura 5.3 – Diagrama de Arquitetura Física [PAB]



Fonte: Autor.

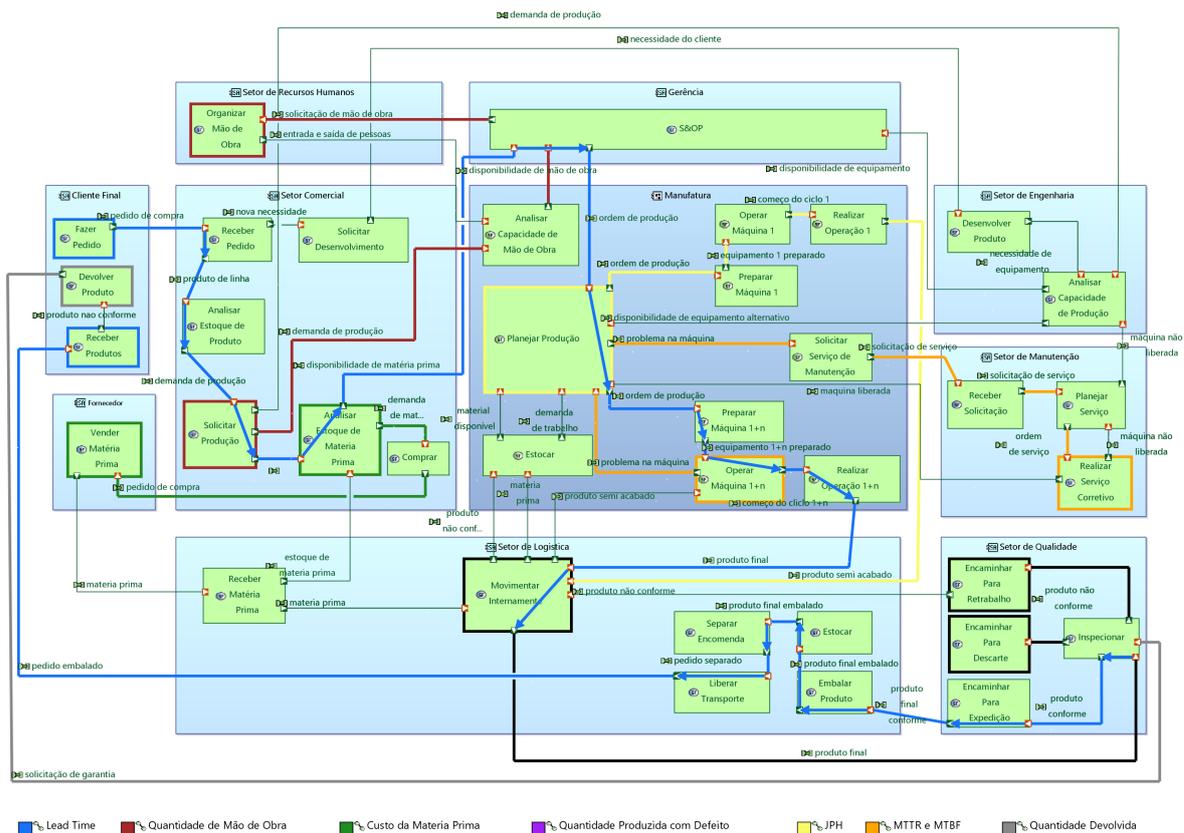
Destaca-se que diversas funções a mais poderiam ter sido identificadas nesses subsistemas. Por exemplo, no Planejamento de Mão de Obra poderiam ser incluídas as análises de trabalho padrão, ou na divisão de Produção poderiam ser acrescentados subsistemas relacionados a Ferramentas ou Documentos. Contudo, entende-se que para o objetivo desse trabalho não há necessidade de aumentar o nível de complexidade do sistema.

5.4 IDENTIFICAÇÃO DE CAMINHOS CRÍTICOS

Na etapa final, visando apontar os pontos críticos do processo com relação às capacidades do sistema (determinadas na Seção 5.1), identificaram-se os caminhos críticos por meio de *functional chains* e diagramas de cenário associados a cada capacidade operacional. Nesse caso, definiram-se como pontos críticos os pontos de saída de indicadores de desempenho produtivo atrelados a determinada capacidade. Esses indicadores foram esclarecidos na Seção 2.1.2.

No processo descrito na Seção 5.2, desde a entrada do pedido do cliente até o recebimento do produto final, identifica-se um dos principais indicadores de produção, o *Lead Time*, representado no diagrama da Figura 5.4 (disponível no Apêndice C) por meio de uma *functional chain*. Da mesma forma, na Figura 5.4 são identificados os caminhos referente a alguns KPIs, conforme apresentado na Seção 2.1.2, os quais influenciam diretamente nas capacidades operacionais do sistema.

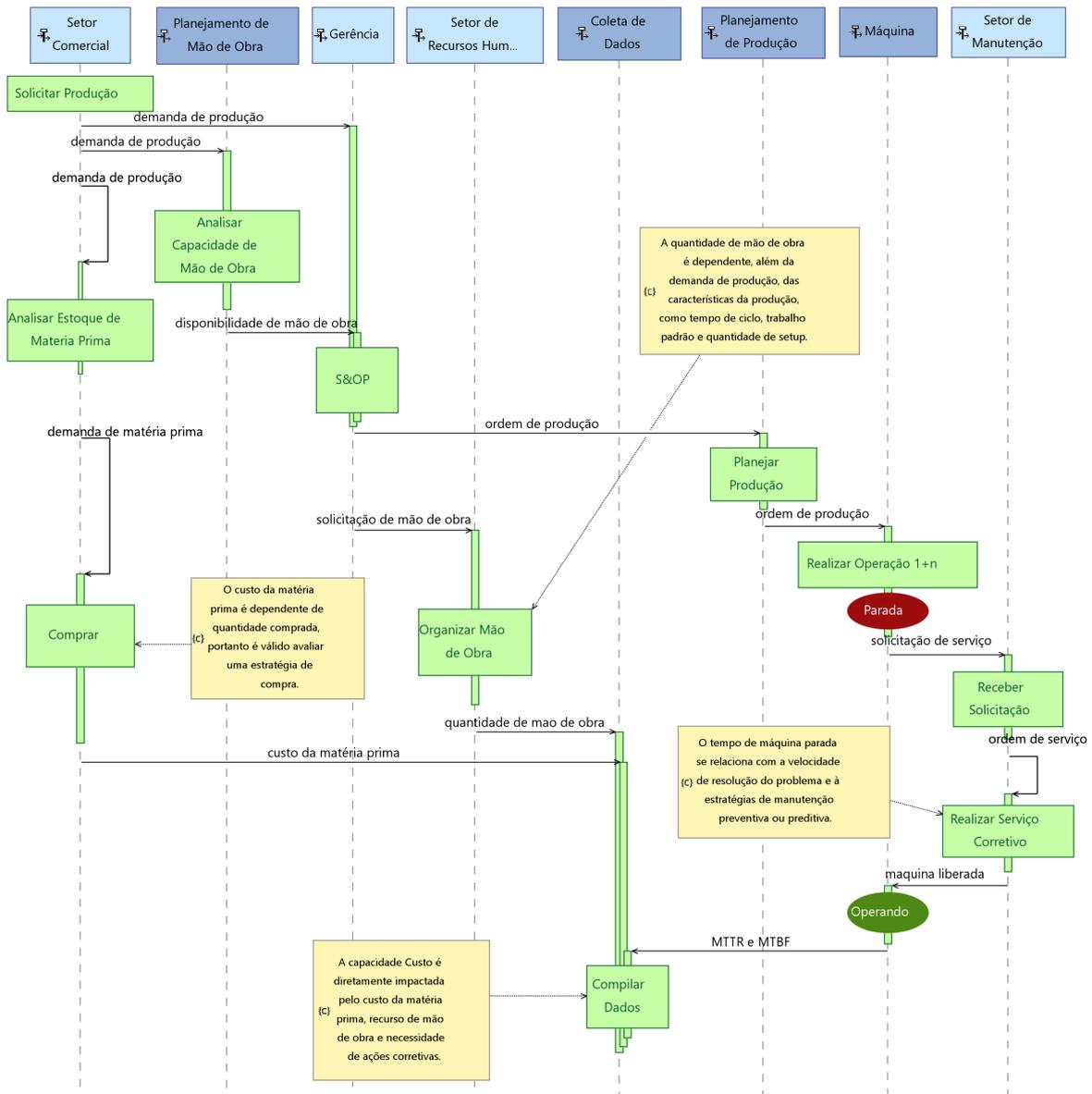
Figura 5.4 – Diagrama de Arquitetura KPIs [SAB]



Fonte: Autor.

Da mesma forma, o diagrama de cenário para capacidade operacional do sistema denominada Custo, Figura 5.5, representa o caminho dos seguintes indicadores: Custo de Matéria Prima, Quantidade de Mão de Obra e MTBF.

Figura 5.5 – Diagrama de Cenários [ES] para Capacidade Custo



Fonte: Autor.

5.5 APLICAÇÃO ESPECÍFICA

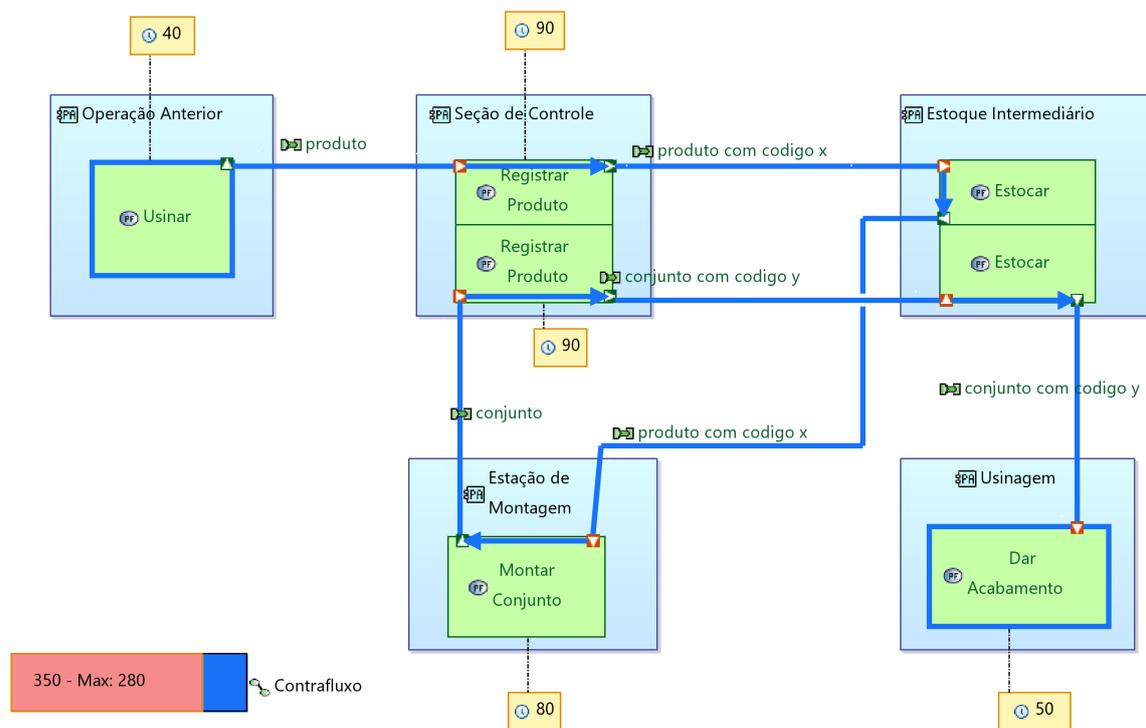
Mantendo em consideração os requisitos do cliente como prazo, qualidade e custo, a presente seção exemplifica uma possível análise a ser realizada via Capella. O exemplo estudado representa um caso real vivenciado pelo autor.

Sabe-se que o indicador *Lead Time* pode ser dividido e analisado a cada etapa do processo, permitindo compreender os fluxos que de maior impacto ao indicador como um todo. Nesse sentido, as Figura 5.6 e 5.7 representam uma parte de um processo de

fabricação e a *functional chain* caracteriza o caminho do *Lead Time* nessa etapa. A qual é representada por três processos de fabricação: usinagem, montagem e acabamento. Ainda, utilizou-se o recurso *Viewpoint Manager* para representação dos tempos de cada função. Para análise do caso em questão considerou-se um *Takt Time* de 280 segundos.

O processo existente se caracterizava por um produto possuindo determinado código de controle. Quando esse produto é montado com outro, o conjunto precisa alterar seu código de controle para representar a operação de montagem. Após montado e com novo código esse conjunto passa para operação de acabamento. Conforme Figura 5.6, essa sequência de operações acarreta em um contrafluxo no processo, caracterizado pela necessidade de retorno do produto à seção de controle para alteração de código. Ainda, essa espera ocasionada pela falta de cadência no processo leva à necessidade de criação de um estoque intermediário entre as operações.

Figura 5.6 – Diagrama de Arquitetura do Processo Inicial - Contrafluxo



Fonte: Autor.

Para efeito do exemplo, consideraram-se os seguintes tempos para cada operação:

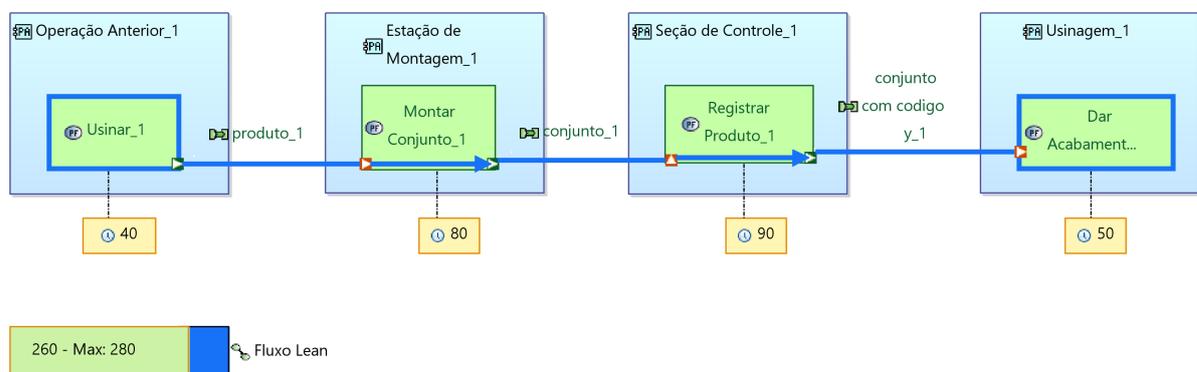
- Usinagem de 40 segundos
- Registro de 90 segundos
- Montagem de 80 segundos
- Acabamento de 50 segundos

- *Takt Time* de 280 segundos

Para o fluxo representado na Figura 5.6, o *Lead Time* ficou igual a 350 segundos, o que não atende o *Takt Time* necessário, conforme representado pela caixa em vermelho no canto inferior esquerdo.

Com a análise realizada, observaram-se oportunidades de otimização do fluxo por meio do reposicionamento de algumas operações. Dessa forma, a Figura 5.7 representa o processo otimizado, reduzindo o *Lead Time* para 260 segundos e eliminando o estoque intermediário entre as operações.

Figura 5.7 – Diagrama de Arquitetura do Processo Otimizado - Fluxo Lean



Fonte: Autor.

6 DISCUSSÕES

O capítulo apresenta uma análise da metodologia proposta. A análise evidencia as contribuições do trabalho por meio de comparações entre a metodologia proposta no 4, a fundamentação teórica do Capítulo 2, a revisão bibliográfica do Capítulo 3 e a aplicação do Capítulo 5.

Conforme apresentado no Capítulo 2, os processos produtivos necessitam de constante mudança para acompanhar as tendências externas e manter as empresas competitivas no mercado. As atuais características inerentes a um processo de manufatura estão fortemente relacionadas à flexibilidade e redução de custos. A flexibilidade, de acordo com a metodologia de produção enxuta, exige equipamentos adaptáveis, pequenos lotes de produção e conhecimento de mais de uma etapa do processo. No mesmo sentido, a redução de custos pode ser alcançada por meio da detecção de defeitos o mais cedo possível, antes que o produto possua maior valor agregado, e do comprometimento de todos os envolvidos no processo, seja gerência ou chão de fábrica, na resolução de problemas e busca por melhoria contínua.

O modelo proposto auxilia na compreensão do processo produtivo de forma acessível a todos os envolvidos na produção, permitindo encontrar-se no processo, avaliar seu impacto e identificar como suas propostas de melhoria podem afetar positiva ou negativamente o processo como um todo. Entende-se que as necessidades de adaptação durante o processo de manufatura, bem como a fabricação de diversos modelos em pequenos lotes exige um planejamento de produção muito bem organizado. O que pode ser observado no diagrama da Figura 5.3, onde o subsistema "Planejamento" alerta sua criticidade no processo devido ao seu elevado número de entradas e saídas e sua interface com todos os outros setores da empresa. O alerta de criticidade indica a necessidade de maior cuidado com a estruturação desse setor, seja em relação a quantidade de pessoas, conhecimento ou processos internos, e a considerar a utilização de *backups*.

O Capítulo 3 constata que, apesar da abrangente aplicação da metodologia de MBSE em de processos produtivos, essas aplicações se concentram na modelagem de novas linhas de produção e no desenvolvimento integrado entre processo e produto. Esse fato aliado às necessidades de adaptação da manufatura para atender as novas exigências de mercado sustentam a validade da proposta em desenvolver um novo método de análise de processos industriais consolidados visando identificar os pontos chave para melhoria contínua. Sendo um ponto forte no emprego da MBSE a reutilização dos modelos e, principalmente, a concentração de todas as informações em um modelo de referência. No mesmo contexto, a utilização de uma ferramenta gratuita e de código aberto oferece a possibilidade de interações do modelo com as diversas ferramentas de simulação de chão de fábrica disponíveis no mercado.

Assim como Steimer, Fischer e Aurich (2017), percebe-se que apesar da flexibilidade da ferramenta, a ausência de uma biblioteca de manufatura leva à necessidade de adaptações pouco intuitivas, o que exige conhecimento específico para efetivação da modelagem, tanto na construção do modelo quanto na sua análise, impactando também na ampla utilização da metodologia por parte das empresas. Conforme o escopo da modelagem aumenta, aumenta também a complexidade da modelagem, podendo torná-la de difícil compreensão, principalmente se não há expertise no assunto.

O Capítulo 5 apresentou a aplicação do método proposto. Primeiramente aplica-se a um processo produtivo de um ponto de vista macro e com o objetivo de identificar os indicadores de desempenho de produção. Ao final, desenvolve-se uma aplicação específica a uma célula de produção na perspectiva de identificar pontos de melhoria. Em relação ao primeiro caso, percebe-se que a utilização de *functional chains* para mapear ao caminho dos indicadores se mostrou eficiente para identificar as funções que mais interferem nesses parâmetros. Essa identificação permite a concentração dos esforços de melhoria nas funções adequadas ao indicador de desempenho em questão. Mais especificamente para o caso do *Lead Time*, essa medida pode ser decomposta ao longo do processo de produção viabilizando enxergar quais os subprocessos de mais impacto. Destaca-se, ainda, que a associação dos indicadores de desempenho às capacidades definidas para o sistema validam a necessidade de empenho em determinadas funções para garantir a entrega dos requisitos do sistema.

Nesse sentido, identificaram-se alguns pontos importantes na modelagem realizada. Sendo um dos requisitos da manufatura enxuta encontrar defeitos no produto o quanto antes durante o processo, o sistema, da forma proposta não atende. Uma vez que as funções de inspeção de qualidade foram alocadas ao Setor de Qualidade e é realizada somente ao final do processo produtivo. Assim, pode-se concluir que é necessário acrescentar funções relacionadas à inspeção de qualidade no sistema Manufatura, o que permite impactaria positivamente no atendimento as três capacidades esperadas do sistema: prazo, qualidade e custo. Da mesma forma, ao identificar que a saída de alguns indicadores de desempenho acontecem dentro do sistema, parece razoável a criação de um subsistema de Coleta de Dados. Pensando no indicador de JPH, é fundamental definir como será feita a coleta desses dados pelo sistema Manufatura, por exemplo, se será necessário instalar um contador de ciclos na máquina ou o próprio operador irá registrar esses dados. Ao optar pela segunda opção se cria uma nova função ao subsistema mão de obra.

No segundo caso, pôde-se observar uma funcionalidade do Capella que vai ao encontro das necessidades de diversas análises realizadas em uma linha de produção. Por meio da determinação do tempo de cada operação, observa-se facilmente os pontos críticos da operação, os quais, unidos ao digrama de arquitetura, permitem compreender visualmente os pontos fracos e fortes do processo produtivo.

7 CONCLUSÃO

Esse capítulo apresenta o fechamento do trabalho, apresentado o atendimento aos objetivos definidos no Capítulo 1 junto aos benefícios e inconveniências do método proposto.

Retomando a proposta central, o trabalho sugere a utilização da metodologia de MBSE na modelagem de um processo de manufatura existente pela perspectiva de identificar parâmetros de melhoria do processo.

Dessa forma, o Capítulo 2 traz resposta à primeira pergunta levantada (I), apresentando os principais parâmetros de melhoria controlados em um processo de produção como os seguintes: Lead Time, JPH, MTTR, MTBF, quantidade de produtos com defeito, quantidade de produtos devolvidos e custo de produção - diretamente relacionado à quantidade de mão de obra e ao custo da matéria prima. Em complemento, o Capítulo 4, em resposta ao questionamento II, traz um método para modelagem de um processo no Capella, utilizando as etapas de Análise do Sistema e Arquitetura Física e são identificadas as correlações necessárias para efetivação da modelagem de um processo industrial via MBSE e ferramenta Capella.

No mesmo sentido, o Capítulo 5 demonstra como a aplicação do metodologia proposta pode auxiliar na análise de um processo de manufatura e, conseqüentemente, na melhoria contínua do processo, orientando a resposta da pergunta III. Por meio de diagramas de arquitetura pode-se identificar as funções chave do processo, bem como suas interfaces. Da mesma forma, ao aplicar *functional chains* para evidenciar o caminho dos indicadores, indica-se uma forma de enxergar os parâmetros de melhoria no modelo, respondendo a pergunta IV. Por meio das *functional chains* e diagramas de cenário pode-se determinar as funções que afetam diretamente o indicador em questão, permitindo focar em pontos críticos do processo para melhoria de determinado indicador. Ainda, a determinação do tempo relacionado a cada etapa de interesse permite verificar facilmente se o processo está atendendo à necessidade, quais os gargalos e as oportunidades de melhoria.

Por fim, em referência à pergunta central do trabalho, conclui-se que é favorável emprego dos conceitos da MBSE junto à ferramenta Capella na modelagem de um processo industrial, seja do processo como um todo ou de um ponto de vista específico. Apesar das limitações relacionadas à necessidade de conhecimento específico de engenharia de sistemas para efetivação da modelagem, uma vez que a ausência de bibliotecas dedicadas a um processo industrial tornam o procedimento pouco intuitivo, destacam-se as vantagens observadas na união dos conceitos de manufatura e MBSE como: possibilidade de reutilização dos modelos, os quais uma vez executados podem facilmente ser desdobrados para outros processos da empresa; centralização de informações em um modelo único, permi-

tindo análise das partes interessadas sem espalhamento de documentos e consequente perda de informações e rastreabilidade; flexibilidade na utilização do modelo para análise de diferentes perspectivas. Características, as quais, unidas a um *software* gratuito e de código aberto, apresentam significativo potencial na aplicação da indústria de manufatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKUNDI, A.; LOPEZ, V.; TSENG, T.-L. B. Identifying the thematic trends of model based systems engineering in manufacturing and production engineering domains. In: **2021 IEEE International Systems Conference (SysCon)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–4.
- BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. **Systems Engineering and Analysis**. London: Pearson, 2014.
- BRUSA, E. Synopsis of the mbse, lean and smart manufacturing in the product and process design for an assessment of the strategy "industry 4.0". In: **CIISE**. [S.l.: s.n.], 2018.
- CALDEIRA, J. **100 Indicadores da Gestão**. Coimbra: Actual, 2012.
- CHIBANE, M.; MHENNI, F.; CHOLEY, J.-Y. Product-process mbse and dysfunctional analysis approach applied to a production line. In: **2019 20th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7.
- CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de Produção e Operações**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- ESTEFAN, J. Survey of model-based systems engineering (mbse) methodologies. **INCOSE MBSE Focus Group**, v. 25, 01 2008.
- FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R. **A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language**. Waltham: Elsevier, 2014.
- HOLT, J.; PERRY, S. **SysML for Systems Engineering: A Model-Based Approach**. London: The Institution of Engineering and Technology, 2018.
- INCOSE. **Systems Engineering Handbook: A guide for system life cycle processes and activities**. San Diego: Wiley, 2015.
- KHALIL, T. et al. Model based systems engineering approach for the improvement of manufacturing system flexibility. In: **2020 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- KHAN, M. A. R.; BILAL, A. Literature survey about elements of manufacturing shop floor operation key performance indicators. In: **2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 586–592.
- MANDEL, C. et al. Model-based systems engineering approaches for the integrated development of product and production systems in the context of industry 4.0. In: **2020 IEEE International Systems Conference (SysCon)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–7.
- MAS, F. et al. Preliminary ontology definition for aerospace assembly lines in airbus using models for manufacturing methodology. **Procedia Manufacturing**, v. 28, p. 207–213, 2019.
- MCDERMOTT, T. et al. **Benchmarking the Benefits and Current Maturity of Model-Based Systems Engineering across the Enterprise: Results of the MBSE Maturity Survey**. [S.l.: s.n.], 2020.
- MORALES-PALMA, D. et al. A preliminary study of models for manufacturing (mfm) applied to incremental sheet forming. In: **IFIP International Conference on Product Lifecycle Management**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 284–293.

MORGAN, J. M.; LIKER, J. K. **Projetando o Futuro: Como a Ford, a Toyota e Outras Empresas de Classe Mundial Usam o Desenvolvimento Lean para Transformar seus Negócios**. Porto Alegre: Bookman, 2020.

NASA. **NASA Systems Engineering Handbook**. Washington: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2016.

OHNO, T. **Toyota Production System**. United States: CRC Press, 1988.

ROQUES, P. **Systems Architecture Modeling with the Arcadia Method**. London: Elsevier and ISTE Press, 2018.

SEBoK Editorial Board. **The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK), v. 2.6**. R.J. Cloutier (Editor in Chief). Hoboken, NJ: The Trustees of the Stevens Institute of Technology, 2021. Acesso em 10 jun. 2022. Disponível em: <sebokwiki.org>.

SHINGO, S. **A Study of the Toyota Production System**. United States: Productivity Press, 1989.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Operations Management**. England: Pearson Education, 2007.

STEIMER, C.; FISCHER, J.; AURICH, J. C. Model-based design process for the early phases of manufacturing system planning using sysml. **Procedia CIRP**, v. 60, p. 163–168, 2017.

Thales. **Datasheet Arcadia**. Thales, 2022. Acesso em 04 abr. 2022. Disponível em: <eclipse.org/capella>.

VOIRIN, J.-L. **Conception architecturale des systèmes basée sur les modèles avec la méthode Arcadia**. London: ISTE Editions, 2012.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **The machine that changed the world**. New York: Free Press, 2007.

APÊNDICE A – DIAGRAMA DE ARQUITETURA DO SISTEMA [SAB]

APÊNDICE B – DIAGRAMA DE ARQUITETURA FÍSICA [PAB]

APÊNDICE C – DIAGRAMA DE ARQUITETURA KPIS [SAB]