

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

MURILLO AUGUSTO ESCARABELIN

**PROPOSTA DE MAPEAMENTO DE FLUXO DE VALOR PARA UMA PLANTA DE
RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO**

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2021

MURILLO AUGUSTO ESCARABELIN

**PROPOSTA DE MAPEAMENTO DE FLUXO DE VALOR PARA UMA PLANTA DE
RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof^o Dr. José Augusto de Oliveira

Coorientadora: Dra. Mirian Paula dos Santos

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2021

E74p

Escarabelin, Murillo Augusto

Proposta de mapeamento de fluxo de valor para uma planta de reciclagem de baterias de íon-lítio / Murillo Augusto Escarabelin. -- São João da Boa Vista, 2021

60 f. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista

Orientador: José Augusto de Oliveira

Coorientadora: Mirian Paula dos Santos

1. Lean Manufacturing. 2. Produção Enxuta. 3. Indústria de Reciclagem. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROPOSTA DE MAPEAMENTO DE FLUXO DE VALOR PARA UMA PLANTA DE
RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO**

Aluno: Murillo Augusto Escarabelin
Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Banca Examinadora:

- José Augusto de Oliveira (Orientador)
- Mirian Paula dos Santos (Co-orientadora)
- Murilo Sartorato (Examinador)
- Rafael Abrantes Penchel (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 002/2021)

São João da Boa Vista, 14 de dezembro de 2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre presente em toda caminhada.

Aos meus pais, Lorenço e Maria, por estarem sempre ao meu lado oferecendo apoio incondicional e motivação para seguir em frente.

Às minhas irmãs, Viviane e Márcia, por toda solidariedade e incentivos prestados.

À minha, noiva, Amanda, por toda compreensão e companheirismo durante essa longa jornada.

Ao meu orientador, José Augusto, que dedicou tempo e esforço para o melhor do trabalho.

A minha co-orientadora, Mirian, que colaborou de forma excepcional para que o trabalho pudesse ser realizado.

A todos meus colegas que foram essenciais para que essa trajetória fosse menos árdua.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta, em especial aos meus professores da UNESP de São João da Boa Vista que compartilharam ensinamentos fundamentais para minha formação.

RESUMO

Para obter os melhores resultados de desempenho operacional em processos de manufatura, as empresas buscam minimizar os desperdícios e maximizar seus lucros, utilizando sistemas de gestão, em especial, o *Lean Manufacturing*. O trabalho em questão teve o objetivo propor um mapeamento do fluxo de valor para uma planta de reciclagem de baterias de íon-lítio, partindo de um cenário laboratorial do sistema de manufatura reversa em uma empresa do setor Eletrônico como estudo de caso. Durante o estudo, foram coletadas características do processo produtivo para realização de simulações através do *software* Tecnomatix™ Siemens, e assim, foram avaliados cenários alternativos e realizado um mapeamento do fluxo de valor, partindo da ótica operacional. Os resultados obtidos, foram utilizados como sugestão para o *layout* a ser implementado na fábrica de uma empresa do setor eletrônico, para a produção de baterias de íon-lítio, localizada em São João da Boa Vista, interior do Estado de São Paulo.

Palavras-chave: manufatura reversa; indústria eletrônica; simulação; produção enxuta

ABSTRACT

To obtain the best operational performance results in manufacturing processes, companies seek to minimize waste and maximize profits, using management systems, in particular, Lean Manufacturing. The work in question had the objective of proposing a mapping of the value stream for a lithium-ion battery recycling plant, starting from a laboratory scenario of the reverse manufacturing system in a company in the Electronics sector as a case study. During the study, the characteristics of the production process were collected to carry out simulations using the Tecnomatix™ Siemens software, and thus, alternative locations were chosen and a mapping of the value stream was carried out, starting from the operational perspective. The results obtained were used as a suggestion for the layout to be implemented in the factory of a company in the electronics sector, for the production of lithium-ion batteries, located in São João da Boa Vista, in the interior of the State of São Paulo..

Keywords: reverse manufacturing; electronic industry; simulation; lean manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema Kanban

Figura 2 – Componentes utilizados no MFV

Figura 3 – Canais reversos de revalorização

Figura 4 – Fluxograma das etapas do trabalho

Figura 5 – Fluxograma laboratorial de remanufatura de baterias.

Figura 6 – Esquemático 3D do cenário 1

Figura 7 – Estatísticas de trabalho cenário 1

Figura 8 – MFV cenário 1

Figura 9 – Esquemático 3D do cenário 2

Figura 10 – Comparativo de trabalho cenários 1 e 2

Figura 11 – Esquemático 3D do cenário 3

Figura 12 – Comparativo de trabalho cenários 1, 2 e 3

Figura 13 – Esquemático 3D do cenário 4

Figura 14 – Comparativo de trabalho cenários 1, 2, 3 e 4

Figura 15 – Esquemático 3D do cenário 5

Figura 16 – MFV cenário 5

Figura 17 – Comparativo de trabalho cenários 1, 2, 3, 4 e 5

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

JIT - Just In Time

LCO - Óxido de Lítio Cobalto

LIB - Lithium ion battery

LM - Lean Manufacturing

LT - Lead Time

ME - Manufatura Enxuta

MFV - Mapa de Fluxo de Valor

NMC - Níquel, Manganês e Cobalto

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

PE - Produção Enxuta

STP - Sistema Toyota de Produção

TPS - Toyota Production System

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVOS	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 LEAN MANUFACTURING	12
2.1.1 OS OITO DESPERDÍCIOS	15
2.1.1.1 DESPERDÍCIO POR SUPERPRODUÇÃO	16
2.1.1.2 DESPERDÍCIO POR ESTOQUE	17
2.1.1.3 DESPERDÍCIO INTELECTUAL	18
2.1.1.4 DESPERDÍCIO POR MOVIMENTOS DESNECESSÁRIOS	18
2.1.1.5 DESPERDÍCIO POR ESPERA	19
2.1.1.6 DESPERDÍCIO POR PROCESSOS DESNECESSÁRIOS	20
2.1.1.7 DESPERDÍCIO POR DEFEITOS E RETRABALHOS	20
2.1.1.8 DESPERDÍCIO POR TRANSPORTE	21
2.2 CINCO PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS	21
2.2.1 ESPECIFICAÇÃO DE VALOR	22
2.2.2 CADEIA DE VALOR	22
2.2.3 FLUXO DA CADEIA DE VALOR	23
2.2.4 PRODUÇÃO PUXADA	23
2.2.5 BUSCA DA PERFEIÇÃO	23
2.3 PRINCIPAIS FERRAMENTAS DO LEAN MANUFACTURING	23
2.3.1 KANBAN	24
2.3.2 JUST IN TIME	25
2.3.3 MAPA DE FLUXO DE VALOR	26
2.3.4 KAIZEN	27
2.4 DIFICULDADES PARA IMPLEMENTAR O LEAN MANUFACTURING	28
2.5 PROCESSO DE MANUFATURA REVERSA	28
2.6 EMPRESA ENERGY SOURCE	29
2.6.1 DETALHES DO PRODUTO	29
2.6.1.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PRODUTO	30
3 METODOLOGIA	30
3.1 MÉTODO DE PESQUISA	31
3.1.1 FASE DE PREPARAÇÃO	31
3.1.2 FASE DE EXECUÇÃO	31

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DO ARRANJO	34
4.2 SIMULAÇÃO	37
4.2.1 CENÁRIO INICIAL	38
4.2.2 SEGUNDO CENÁRIO	42
4.2.3 TERCEIRO CENÁRIO	44
4.2.4 QUARTO CENÁRIO	46
4.2.5 QUINTO CENÁRIO	48
4.3 COMPARATIVO	51
5 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	53
APÊNDICE A	56

1. INTRODUÇÃO

A economia mundial e as indústrias sofrem transformações constantemente, essas se iniciaram a partir da década de 1970. Segundo Coriat (1988), antes dos anos 70 as capacidades produtivas eram inferiores às necessidades globais, onde os preços e produtos eram definidos pelas próprias indústrias, em detrimento à alta demanda de mercado (MAGRISE, 2000).

A indústria ocupa um papel fundamental na sociedade organizada, responsável por prover produtos e serviços de interesse da sociedade, entre eles, produtos/serviços essenciais para melhorar a qualidade de vida, lazer, transporte, etc. (GROOVER, 2007; KALPAKJIAN, 2001).

No setor eletrônico, a indústria se caracteriza por ser altamente dinâmica, trazendo inovações para o mercado constantemente. O setor possui uma característica essencial do ponto de vista para os demais departamentos da economia, com suas inovações e soluções tecnológicas. Para alcançar as expectativas, trata-se de uma atividade atrelada a altos investimentos relacionados à Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), além de alta tecnologia (DONADEL, 2020).

Do ponto de vista da economia brasileira, a indústria eletroeletrônica representou 2,3 % do Produto Interno Bruto (PIB) nacional no ano de 2020, segundo os dados da Associação Brasileira da Indústria Elétrica Eletrônica (Abinee). O setor foi responsável por oferecer empregos a 248 mil trabalhadores em 2020, sendo fundamental para o crescimento brasileiro (ABINEE, 2021).

Com a necessidade de minimizar as perdas e maximizar a produção industrial em um cenário altamente competitivo e volátil, o Lean Manufacturing (LM), combina as técnicas gerenciais a fim de tornar a empresa referência em padrão (BARTZ, 2013). Esta filosofia foi adaptada do Sistema Toyota de Produção (STP), que surgiu nos meados de 1950, na empresa Toyota, através do executivo da fábrica na época, Taiichi Ohno. Segundo Ohno (1997), o STP vislumbrava a redução nos desperdícios presente na produção contemporânea, entre eles, defeitos e retrabalhos em produtos, movimentações desnecessárias, transportes desnecessários, estoques, superprodução, desperdícios intelectuais e processos desnecessários. Este sistema se espalhou pelo mundo, tornando-o referência no mercado ocidental e mundial (WERKEMA, 2006).

Conforme o modelo de produção foi se expandindo e se consolidando como modelo ideal de gestão para época, foram discutidos termos mais unificados, chegando no nome Lean Manufacturing, popularizado devido à publicação do livro *The Machine that Changed the World* em 1990 nos Estados Unidos, desenvolvido pelos escritores James P. Womack, Daniel T. Jones e Daniel Roos, baseado em um estudo detalhado sobre a indústria automobilística mundial, realizado pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), avaliando os resultados e métricas alcançadas ao utilizar o até então chamado, STP, demonstrando êxito na produtividade, qualidade e desenvolvimento dos produtos, justificando o sucesso e a retomada da indústria japonesa (HINO, 2009).

Destaca-se que a LM se trata de uma filosofia, necessitando uma transformação cultural e organizacional dentro da empresa, para que os resultados esperados sejam obtidos. Um princípio fundamental para essa mudança cultural é o da melhoria contínua, buscando sempre aprimoramentos e técnicas inovadoras (WERKEMA, 2006). Conforme essa filosofia é implementada, a LM satisfaz as exigências para aumentar a capacidade produtiva industrial, satisfazendo seus clientes, com produtos de alta qualidade, baixo custo e no tempo correto de entrega (WERKEMA, 2006).

Caracterizando o LM, outra importante propriedade a ser analisada é a otimização do *layout* produtivo, que se trata do arranjo físico do chão de fábrica e a disposição das estações de trabalho, proporciona uma redução de perdas em diversos cenários, e desperdícios presentes nos processos produtivos, entre eles, à perda intelectual, à perda por processos desnecessários, perdas recorrentes a estoques, movimentos desnecessários, ocorrência de gargalos, entre outros que serão exemplificados durante o texto. Além de proporcionar um melhor ambiente e condições mais próximas do ideal, motivando o funcionário (MONDEN, 1984).

Em especial no setor eletrônico, dado o avanço das pesquisas e da tecnologia, foi possível a implementação de baterias de íon-lítio (LIB) em diversas áreas de interesse, entre elas, nos dispositivos portáteis e carros elétricos, isso se dá devido aos avanços com relação à ausência do efeito de memória, alta densidade energética, dimensões reduzidas e alto desempenho (HOREH; MOUSAVI; SHOJAOSADATI, 2016).

Os principais metais que constituem a LIB metálicas são cobalto, lítio, alumínio e cobre. Em determinadas situações, o cátodo pode conter manganês e níquel em sua composição (DORELLA; MANSUR, 2007). Do ponto de vista econômico torna-se necessário

agregar mais valor a novos ciclos de vida do produto, que é concretizado pela reciclagem das mesmas.

Partindo do ponto de vista ambiental, inúmeros benefícios são atingidos pela reciclagem de resíduo eletrônico, dentre elas a LIB. Além da intuitiva redução de materiais tóxicos e agressivos inseridos no meio ambiente, também é reduzida a necessidade de exploração de minérios e metais, desta forma, reduzindo as emissões de gases e poluentes na atmosfera (BALDE; WANG; KUEHR; HUISMAN, 2015).

Algumas tecnologias têm sido pesquisadas, desenvolvidas e propostas em escala laboratorial, podendo-se mencionar Santos et al. (2021). Apesar de ainda restarem lacunas científicas para as tecnologias de reciclagem de LIB em escala laboratorial, um grande desafio se encontra no escalonamento industrial desse tipo de tecnologia.

Com isso, surgiu a seguinte questão: Dentro do escopo de uma planta industrial de reciclagem de baterias de íon lítio, qual seria a configuração de *layout* inicial produtivo para obter-se o melhor desempenho operacional?

1.1 JUSTIFICATIVA

Neste contexto, há a necessidade de realizar um mapeamento do fluxo de valor da planta em questão, onde os movimentos dos trabalhadores devem ser os mínimos necessários, os insumos utilizados na proporção correta, desta forma, aumentando significativamente a produção de forma eficiente.

Num cenário altamente competitivo entre as empresas, principalmente no setor de Eletrônica, as inovações nos processos são fundamentais para uma vida longa da empresa, neste caso, as simulações são valiosas ferramentas para determinar o melhor e mais favorável cenário. As simulações da manufatura fazem parte do rol de tecnologias da Indústria 4.0, e auferem benefícios às empresas, pois apresentam riscos mais baixos, custos reduzidos e evitam paradas na produção, possibilitando a avaliação de cenários alternativos para a proposição e posterior implementação de uma alternativa mais eficiente.

Por um lado, tem-se a LM como um sistema produtivo amparado com um amplo rol de técnicas reconhecidas mundialmente como sinônimo de eficiência e eficácia, e por outro

lado, não foram encontrados trabalhos na literatura científica e de práticas empresariais que aplicassem técnicas de LM em plantas fabris de reciclagem de LIB.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo apresentar um mapeamento do fluxo de valor da planta de reciclagem de baterias de íon-lítio, baseado nos conceitos de LM, no setor de Engenharia Eletrônica. Para alcançar este objetivo, foram estudadas e discutidas diversas combinações e cenários possíveis de *layout*, determinando o melhor caso entre eles, analisando os prós e contras de cada um e as limitações físicas do espaço. As simulações foram realizadas no *software* TecnomatixTM da Siemens.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LEAN MANUFACTURING

A *Lean Manufacturing* (LM)¹, com tradução livre de Manufatura Enxuta (ME), também conhecido por Produção Enxuta (PE), trata-se de uma filosofia aplicada à gestão, com o intuito de tornar a empresa mais eficiente, ou seja, produzir cada vez mais com menos, eliminando desperdícios e elementos dispensáveis, reduzindo seus custos operacionais e produzindo o essencial para a demanda atual.

A LM é uma adaptação ocidental e mundial do STP, que surgiu no Japão após a Segunda Guerra Mundial, em meados de 1955. O responsável pelo seu desenvolvimento foi Taiichi Ohno, engenheiro e chefe da produção da montadora Toyota, em um período difícil de reestruturação japonesa. O sistema de gestão elaborado por Ohno buscava combinar e alcançar o menor custo, menores prazos e não abrindo mão da excelência e qualidade, intitulado por STP (OHNO, 1997).

Segundo, Taiichi Ohno (1997), uma frase referência para a definição do STP, citada em seu próprio livro, Sistema Toyota de Produção: Além da Produção em Larga Escala, publicado em 1997.

¹ Nessa pesquisa, os conceitos foram considerados como sinônimos e adotou-se o conceito-padrão de Lean Manufacturing.

A eliminação de desperdícios e elementos desnecessários a fim de reduzir custos; a ideia básica é produzir apenas o necessário, no momento necessário e na quantidade requerida (OHNO, 1997, p. 41).

Os resultados e o sucesso notório observado na fabricação, o STP se espalhou por todo o Japão, posteriormente para Europa e Estados Unidos, alcançando níveis mundiais, nos mais variados setores, entre eles as montadoras automotivas, eletrônicos, manufatura entre outros, validando e consolidando a filosofia de gestão.

Com o passar dos anos, foram realizados estudos a fim de entender e detalhar cada vez mais o STP, em forma de pesquisas, artigos e livros, como no livro “O Modelo Toyota”, produzido por Jeffrey Liker em 2003, citando os 14 princípios do STP, conforme apresentado a seguir:

1º Princípio: Basear as decisões administrativas em uma filosofia de longo prazo, mesmo em detrimento de metas financeiras de curto prazo.

2º Princípio: Criar um fluxo de processo contínuo para trazer à tona os problemas.

3º Princípio: Usar sistemas puxados para combater a superprodução.

4º Princípio: Nivelar a carga de trabalho (*Heijunka*). Trabalhar como tartaruga, não como à lebre.

5º Princípio: Construir uma cultura de parar e resolver os problemas, obtendo a qualidade na primeira tentativa.

6º Princípio: Tarefas padronizadas são a base para a melhoria contínua e a capacitação dos funcionários.

7º Princípio: Usar controle visual para que nenhum problema fique oculto.

8º Princípio: Usar tecnologia confiável e completamente testada que atenda aos funcionários e processos.

9º Princípio: Desenvolver líderes que compreendam completamente o trabalho, que vivam a filosofia e ensinem aos outros.

10º Princípio: Desenvolver pessoas e equipes excepcionais que sigam a filosofia da empresa.

11º Princípio: Respeitar sua rede de parceiros e de fornecedores, desafiando-os e ajudando-os a melhorar.

12º Princípio: Ver por si mesmo para compreender completamente a situação (*Genchi Genbutsu*).

13º Princípio: Tomar decisões lentamente por consenso, considerando completamente todas as opções; implementá-las com rapidez.

14º Princípio: Tornar-se uma organização de aprendizagem através da reflexão incansável (*Hansei*) e da melhoria contínua (*Kaizen*). (LIKER, 2005, p. 15).

O LM tem como intuito maximizar a produção utilizando o mínimo de recursos possível, enxugando os custos para potencializar os lucros da empresa, com esta premissa, são combinadas características das produções artesanais e em massa, unindo seus principais pontos positivos.

A produção em massa é caracterizada por profissionais qualificados que projetam produtos e maquinários com alto valor agregado, que são produzidos e operados por trabalhadores com pouca ou nenhuma especialização; a produção dos produtos costuma ser sequencial e intermitente, sendo eles padronizados, havendo pouca flexibilidade para variações de suas propriedades. Como são gerados grandes lotes de fabricação, acarretam em altos volumes de estoque, gerando desperdícios e prejuízos à empresa. Do ponto de vista do trabalhador, há baixa motivação e alta cobrança em combate ao tempo ocioso, muitas vezes de forma autoritária, justificada devido aos custos elevados do maquinário e tempo parado da linha de produção.

Já na produção artesanal, são necessários trabalhadores altamente qualificados, realizando um trabalho artesanal, produtos personalizados e específicos para cada cliente e perfil, gerando um alto valor agregado. Sua dificuldade se dá pela baixa escalabilidade, os produtos são manufaturados de forma individual, necessitando maiores prazos e recursos, nesta técnica, são dispensados os altos volumes em estoque, devido à produção personalizada conduzida pela demanda (HINO, 2009).

Desta maneira, combinando suas principais vantagens e evitando suas desvantagens, é formado o LM, produzindo em alta escala, com flexibilidade, trabalhadores ordenados na hierarquia por sua especialização, preocupação com a motivação dos funcionários e qualidade do produto final, são minimizadas as necessidades de estoque, enxugando custos e desperdícios. São necessários menos trabalhadores, menor espaço físico e menor investimento com maquinário produtivo, através da implementação da filosofia LM, baseada em suas técnicas gerenciais e pensamento produtivo.

Para o sucesso do modelo LM, um alicerce essencial foi o da melhoria contínua (*Kaizen*), que intensifica a procura por melhorias e aprimoramentos nas técnicas de produção utilizadas, sendo fundamental para alcançar o nível de excelência. Na mão de obra, é adotado

o Procedimento Operacional Padrão (POP), gerando rotinas para ambientar melhor o trabalhador, a fim de evitar erros e falhas humanas. No maquinário, o tempo de manutenção e *setup* são encarados como desperdício por estarem ociosos, para evitar este cenário, são realizadas manutenções preventivas, buscando prevenir problemas no decorrer do processo produtivo da máquina (ANTUNES, 1998). O *setup* é o tempo exigido para limpeza e preparação da máquina para realizar sua próxima atividade.

Como mencionado, ao empregar o LM, deseja-se reprimir os custos, reduzindo entre outros fatores, tempo de manutenção e setup das máquinas, tempo ocioso dos trabalhadores, retrabalho, movimentações desnecessárias e embaralhamento de processos, perda de produtos e matéria prima, estoques etc. Um princípio utilizado para alcançar as metas citadas, é o Princípio do Não-Custo, segundo Antunes (1998), divide-se em três principais tópicos:

“I. Eliminação completa de perdas.

II. Minimização ou eliminação do trabalho adicional.

III. Aumento da densidade do trabalho humano - aumentar o tempo em que os trabalhadores realizam tarefas que agregam valor ao produto.” (ANTUNES, 1998, p. 16).

Para determinar o preço de um produto, costuma-se utilizar-se a Equação 1, que manipulada sob a ótica da PE, resulta na Equação 2, demonstrando que para maximizar o Lucro, os Custos devem ser os menores praticáveis.

$$\text{Preço} = \text{Custo} + \text{Lucro} \quad (1)$$

$$\text{Preço} - \text{Custo} = \text{Lucro} \quad (2)$$

2.1.1 OS OITO DESPERDÍCIOS

Segundo Ohno (1997), Shingo (1996) e Ghinato (1996), no STP eram analisadas e combatidas as sete principais perdas, que são elas: perdas por superprodução, por transporte, por fabricação de produtos defeituosos, movimentos desnecessários, processamento, por espera e estoque. Na atualidade, foi inserida uma nova perda neste grupo, tornando-o com oito grandes perdas, o desperdício intelectual foi o novo integrante do grupo a ser evitado.

Combater os oito principais desperdícios são fundamentais para o sucesso na implementação da filosofia do LM, reduzindo de forma sistemática o processo de produção e manufatura, afetando a utilização de insumos e matérias prima, superdimensionamento, necessidade de retrabalho, perdas por transporte ou movimentações desnecessárias, entre outros malefícios para a empresa. São considerados desperdícios todas as atividades em que acarretam custos sem agregar valor ao produto, perdendo tempo e conseqüentemente, dinheiro.

Como premissa do LM, é imprescindível a busca por reduzir e extinguir desperdícios, vislumbrando um cenário mais próximo do ideal, com zero perdas, zero defeitos, zero estoque, entre outros indicadores relevantes. Para se aproximar desta meta, são utilizadas diversas ferramentas de gestão na produção dos produtos, estabelecendo métodos para garantir a qualidade e satisfação do serviço prestado, entre elas, são de destaque o *Just In Time* (JIT), *Kaizen*, *Kanban*, Mapa de Fluxo de Valor (MFV), entre outras, especificadas posteriormente.

Segundo Ohno (1997), o primeiro passo para reduzir e eliminar os desperdícios, é identificá-los, conhecendo suas origens e buscando soluções assertivas. Para Martins e Laugeni (2005), todo e qualquer desperdício deve ser solucionado e combatido, em todos os níveis da cadeia produtiva.

“Os desperdícios, de uma maneira ampla, devem também ser identificados em toda cadeia de valor de cada produto, ou família de produtos para posterior eliminação. Faz parte desta cadeia de valor a identificação do produto, o gerenciamento de informações, desde o aceite do pedido até o planejamento detalhado da entrega, e a transformação física dos materiais.” (MARTINS; LAUGENI, 2005, p. 463).

Os oito principais desperdícios a serem evitados são apresentados e detalhados nos tópicos a seguir.

2.1.1.1 DESPERDÍCIO POR SUPERPRODUÇÃO

A principal característica da perda por superprodução se dá pela produção acima do necessário para o próximo processo, gerando um gargalo de produção. Para o STP, é a maior fonte de desperdício, podendo acobertar as demais perdas geradas durante o processo todo. A mentalidade japonesa na época de 1950, era de produzir o necessário e de interesse do cliente,

evitando excessos e projeções de vendas futuras. (SLACK; CHAMBERS; JOHSTON, 2002; SHINGO; 1996b; MOREIRA, 2011; CORRÊA; GIANESI, 1993).

Dentro das perdas por superprodução, destacam-se dois tipos, a superprodução quantitativa, que se dá pela produção acima do exigido, e a superprodução antecipada, que está relacionada a produzir antes do necessário, acumulando itens.

Antunes (1995) descreve alternativas para atacar às perdas devido a superprodução:

- I. Melhoria no processo de estocagem, através do nivelamento das quantidades e sincronização dos processos, visando a minimização ou eliminação da necessidade de estoques intermediários.
- II. Melhoria no processo de estocagem, por meio da operação em fluxo de uma só peça, ou produção em pequenos lotes. Torna-se também necessário a melhoria no *layout* da fábrica.
- III. Melhoria na operação, através da melhoria dos tempos de preparação de máquinas e ajustes. Os tempos de preparação longos acarretam a necessidade de produção de grandes lotes, resultando na existência de estoques intermediários desnecessários e longos tempos de *lead times*. (ANTUNES, 1995, p. 21).

2.1.1.2 DESPERDÍCIO POR ESTOQUE

A partir da filosofia JIT, o estoque é um alvo a ser atacado, por se tratar de um desperdício de investimento e espaço. Segundo Corrêa e Gianesi (1993), o desperdício decorrente do estoque pode ocultar outras perdas anteriores do processo, e o mesmo está ligado a todos os outros desperdícios, ou seja, reduzindo as perdas em todos os níveis da cadeia produtiva, a perda devido ao estoque será reduzida e eliminada.

Segundo Shingo (1996), a geração de estoque ocorre devido a problemas e ineficiência no processo produtivo, para o autor, acúmulos referentes ao processo geram três tipos de estoques.

- I. Estoque gerado devido à produção antecipada, quando os ciclos de produção são maiores que os ciclos de entrega;
- II. Estoque gerado devido à antecipação de utilizações futuras, decorrente das preocupações com flutuações na demanda;
- III. Estoques gerados para compensar gerenciamento ineficiente na produção, ou esperas devido a inspeção e transporte.

Para Shingo (1996), produções ineficientes geram ainda outros dois tipos de estoque.

- I. Estoques a fim de compensar problemas no maquinário ou produção de produtos defeituosos;
- II. Estoques a fim de compensar perdas de tempo, ocasionados por longos períodos de setup.

O autor sugere ainda, três estratégias a fim de atingir uma produção mais próxima do ideal.

- I. Reduzir drasticamente os ciclos de produção;
- II. Eliminar as quebras e os defeitos, detectando suas causas e buscando solucionar à raiz do problema;
- III. Reduzir os tempos de setup para 10 minutos ou menos, possibilitando a produção em pequenos lotes, permitindo respostas mais ágeis à eventuais flutuações da demanda, dependendo particularmente da indústria.

2.1.1.3 DESPERDÍCIO INTELECTUAL

O mais atual dos desperdícios relacionados a filosofia do LM, o desperdício intelectual, se dá pela falta de habilidade ou treinamento de um profissional em uma função estratégica, com pouca criatividade envolvida comparada com a esperada para o cargo, falta de capacitação ou treinamento para ocupar determinado posto, projetos mal estruturados, processos e campanhas que não agregam valores ao produto na perspectiva do cliente, são os principais fatores que caracterizam as perdas intelectuais. Para combater este desperdício, treinamentos e capacitações são sugeridas, assim como, embasamento correto na estruturação de projetos, distribuição de cargos essenciais para profissionais adequados e preparados, explorar a criatividade para solução de melhorias inerentes aos processos produtivos.

2.1.1.4 DESPERDÍCIO POR MOVIMENTOS DESNECESSÁRIOS

Segundo Shingo (1996), perdas referentes ao movimento são relacionadas a movimentos desnecessários dos trabalhadores, quando os mesmos estão executando ações nas linhas de montagem ou máquinas.

Para Slack, Chambers e Johnston (2002), os operadores podem aparentar estarem ocupados, porém, não há valor sendo agregado ao produto pelo seu trabalho, sendo considerado então, desperdício de movimento, pode-se citar o movimento de buscar uma ferramenta em outra bancada, quando a mesma poderia estar ao alcance das mãos do trabalhador, podendo aproveitar melhor este tempo perdido de movimentação.

2.1.1.5 DESPERDÍCIO POR ESPERA

A perda por espera está associada ao tempo em que os trabalhadores ou máquinas não estão produzindo, enquanto deveriam estar. Entre as possibilidades, pode-se citar a paralisação humana, setup de máquinas, manutenções, entre outros.

Segundo Corrêa e Giansesi (1993), desperdícios por espera estão associados aos materiais que estão aguardando o processamento, ocasionando filas no processamento atual e subsequente, enquanto em alguns pontos há uma superprodução, em outros estão esperando por materiais para a continuidade do processo, havendo perdas de tempo e ociosidade das máquinas e trabalhadores, aguardando que as etapas anteriores sejam concluídas.

Para Shingo (1996), as principais causas para que haja a perda por espera são as seguintes.

- I. Elevado tempo de setup, tempo desperdiçado para trocas de ferramentas ou dispositivos;
- II. Falta de sincronização na produção, não havendo produção uniforme e padronizada, há desbalanceamento da produção e tempo de espera de trabalhadores e máquinas;
- III. Imprevistos na linha de produção, entre eles, falhas e defeitos nos equipamentos, acidentes de trabalho, falta de matéria prima e materiais, entre outros.

Segundo o Shingo (1996), são sugeridas alternativas para prevenir e combater as perdas por espera, que vem a seguir.

- I. Adotar a técnica da Troca Rápida de Ferramentas (TRF);
- II. Utilização de sistemas de sincronização da produção, como a técnica Kanban;
- III. Utilização de sistemas para incrementar a confiabilidade do sistema produtivo, prevenindo falhas e paradas inesperadas.

2.1.1.6 DESPERDÍCIO POR PROCESSOS DESNECESSÁRIOS

Desperdícios por processamento estão ligados às perdas decorrentes a processamentos do produto que não agregam valor ou características básicas de funcionalidade, qualidade e necessidade.

Segundo Corrêa e Giansi (1993), determinadas perdas presentes no processo produtivo podem ser evitadas com análises e questionamentos sobre o processo produtivo, entre elas, o motivo da necessidade dos componentes, sua função no produto, necessidade de suas etapas, qualidade e valor agregado no produto, entre outras. Estes questionamentos são de responsabilidade dos gerentes, que muitas vezes estão preocupados em realizar o processo de forma rápida e sem uma análise profunda, essa metodologia é chamada de Análise de Valor.

Para Antunes (1995), é essencial realizar duas perguntas básicas antes da produção de qualquer produto, as quais devem ser respondidas utilizando uma lógica de análise.

1. Por que este tipo de produto deve ser produzido?
2. Por que este método deve ser utilizado neste tipo de processamento?

2.1.1.7 DESPERDÍCIO POR DEFEITOS E RETRABALHOS

Segundo Corrêa e Giansi (1993), às perdas referentes aos produtos defeituosos ou retrabalho estão ligadas diretamente a problemas de qualidade, gerando os maiores desperdícios do processo como um todo. A produção de produtos com defeitos atinge a disponibilidade de mão de obra, de equipamentos, materiais, movimentação das peças com defeito, armazenagem, avaliação de conserto, entre outras.

Para Slack, Chambers e Johston (2002), esta é a perda mais significativa para a empresa, mesmo sabendo do processo de avaliação da qualidade, os custos de qualidade são maiores do que os considerados, sendo extremamente necessário atacar suas causas.

Deon (2001), diz que a perda quando há necessidade de retrabalho ou o produto é sucateado está diretamente ligada aos padrões de qualidade da empresa. Ao haver necessidade de retrabalho, são adicionados custos de inspeção, reproprocessamento, e muitas vezes, baixas no valor de venda. Já pros casos de sucateamento, além de haver o desperdício de materiais, existem também perdas indiretas, relacionadas à mão de obra anterior, processamento entre outras. Para o autor, a prevenção de defeitos é o ponto principal para evitar eventuais perdas

para a empresa, tornando todo o processo mais confiável. Além dos custos relacionados às perdas de materiais, existem outros danos maiores que estão associados a produtos não conformes, como por exemplo, problemas notados pelo consumidor final, podendo gerar danos à imagem da empresa em proporções muito maiores.

2.1.1.8 DESPERDÍCIO POR TRANSPORTE

A ação de transportar os materiais é encarada como desperdício, pelo princípio de não agregar valor ao produto, porém, indispensável, devido às restrições e necessidades dos espaços físicos ou máquinas, necessitando o manuseio até o local apropriado.

Os autores Corrêa e Gianesi (1996), sugerem que as atividades de movimentação devem ser reduzidas ao máximo, se possível, eliminadas, com um *layout* favorável para a produção, reduzindo assim as distâncias percorridas e o tempo desperdiçado.

Segundo Antunes (1995), são sugeridas duas práticas para implantar ações sequenciadas para diminuir as perdas por transporte.

- I. Executar ações a fim de promover melhorias do *layout*, buscando desta forma a eliminação do transporte;
- II. Executar melhorias no sentido da mecanização e automatização dos trabalhos, sendo difíceis de serem eliminados no curto e médio prazo.

2.2 CINCO PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Para os autores Womack e Jones (2004), a aplicação da filosofia Lean Thinking (Pensamento Enxuto), é primordial para a redução de perdas e desperdícios, determinando os valores, ações corretas que agregam valor ao produto, evitando paradas e perdas durante o processo produtivo. Os princípios definidos por eles, que são os alicerces para o sucesso do LM, são:

- I. Especificação de Valor;
- II. Identificação da Cadeia de Valor;
- III. Fluxo de Valor;
- IV. Produção Puxada;
- V. Busca da Perfeição.

2.2.1 ESPECIFICAÇÃO DE VALOR

Especificar o valor é a base para o Lean Thinking, sendo o mesmo definido pelo cliente, as características do produto para atender seus anseios, por um preço e momento específico. O cliente deseja ser interpretado e que seja oferecido um produto mais personalizado possível, retratando sua personalidade e despertando o desejo de compra, este papel é responsabilidade da empresa, que deve definir os valores de forma adequada, variando seu produto muitas vezes de regiões para regiões, atendendo às necessidades dos consumidores. (WOMACK; JONES, 2004).

2.2.2 CADEIA DE VALOR

A cadeia de valor se constitui pela junção de atividades necessárias para aplicar as tarefas gerenciais críticas do negócio ao produto, a primeira tarefa é a solução de problemas, que analisa desde a criação do produto até o seu lançamento. A segunda tarefa é chamada de gerenciamento da informação, onde são realizadas análises a partir da solicitação até a entrega do produto ao consumidor. A terceira e última tarefa, chamada de transformação física, é responsável pela transformação da matéria-prima ao produto final comercializado. (WOMACK; JONES, 2004).

Para caracterizar a cadeia de valor, é necessário ainda mapear todas as atividades realizadas para a produção do produto, separadas nas seguintes categorias.

- I. Atividades que agregam valor;
- II. Atividades que não agregam valor, mas necessárias;
- III. Atividades que não agregam valor, desnecessárias.

O primeiro grupo deve ser mantido e priorizado, o segundo refere-se a etapas que não agregam valor, porém, são necessárias para manutenções e garantem a qualidade final do produto. Por fim, o terceiro grupo deve ser evitado e eliminado das atividades de produção (WOMACK; JONES, 2004).

2.2.3 FLUXO DA CADEIA DE VALOR

O segundo passo, depois de determinar os valores para o cliente e as atividades que agregam valor ao produto, há a necessidade de realizar um funil nessas atividades, separando as que não geram valor ao produto, sendo caracterizado um desperdício. Determinadas as ações positivas, inicia-se a etapa para que a produção ocorra de forma contínua e flua naturalmente, alterando o foco para o produto e suas especificações, em detrimento às organizações e equipamentos, melhorando o fluxo da produção (WOMACK; JONES, 2004).

2.2.4 PRODUÇÃO PUXADA

Ao introduzir corretamente o fluxo contínuo, os tempos de produção são reduzidos drasticamente, desde as etapas de projeto, manufatura e entrega, de tal maneira que o cliente determine o momento em que essas atividades serão realizadas, puxando a produção e atividades da empresa. (WOMACK; JONES, 2004).

A produção puxada tem como principal aspecto a não formação de estoques, de tal maneira que o produto só é produzido sob demanda dos clientes, indo ao contrário da produção empurrada, técnica utilizada até o surgimento do STP, onde as produções eram realizadas em sua capacidade máxima, evitando trabalhadores e máquinas ociosas, acumulando estoques e altos investimentos com materiais, gerando um desperdício, do ponto de vista de não haver demanda e pedidos para vendas (WOMACK; JONES, 2004).

2.2.5 BUSCA DA PERFEIÇÃO

Com os itens anteriores empregados perfeitamente, novos desperdícios e perdas devem ser observados, que estavam ocultos até então. Desta maneira, o foco deve estar no perfeccionismo, buscando extinguir essas perdas e melhorando continuamente os processos internos da empresa, se tornando natural o aperfeiçoamento interno dos colaboradores, prezando sempre pela qualidade final do produto (WOMACK; JONES, 2004).

2.3 PRINCIPAIS FERRAMENTAS DO LEAN MANUFACTURING

Para que seja possível a implementação da filosofia LM, são utilizadas diversas ferramentas, para otimizar a produção, cada qual com a sua característica, amparadas pelos

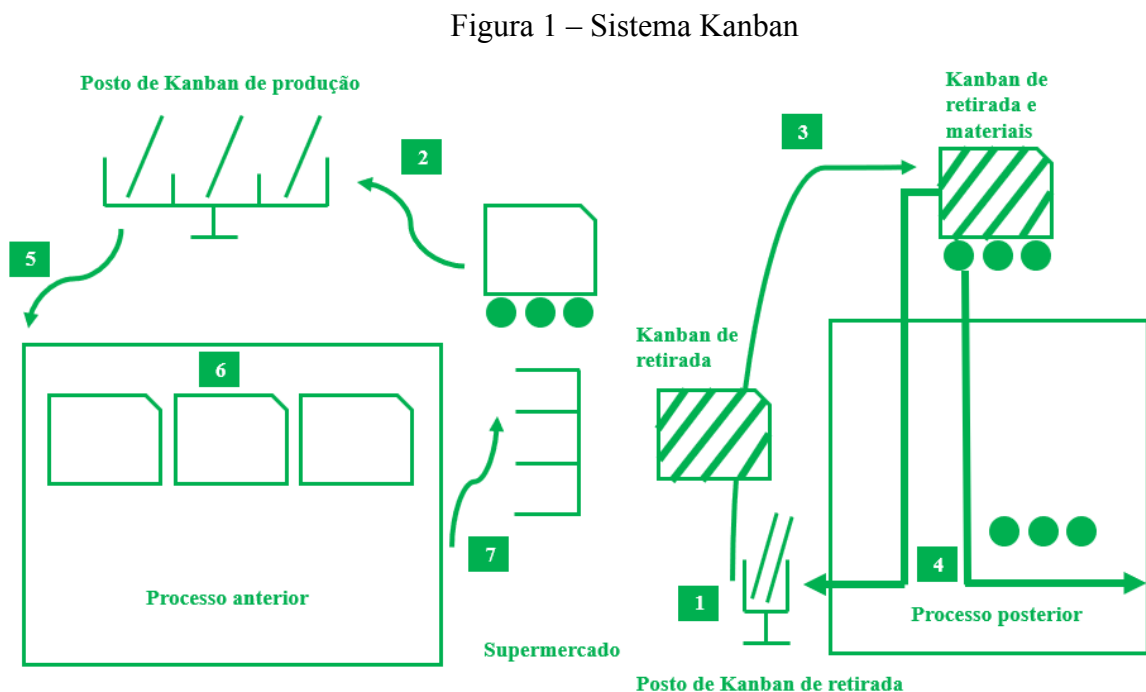
princípios do modelo de gestão, para evitar desperdícios, gestão da qualidade dos produtos, aperfeiçoar e buscar a perfeição na produção. Serão esmiuçadas algumas das principais ferramentas utilizadas para execução do LM.

2.3.1 KANBAN

O *Kanban* tem como intuito sinalizar, autorizando, repassando instruções e orientações à produção, para inserção ou retirada de produtos na produção puxada. Esta técnica surgiu da exigência em tornar os processos mais práticos e diretos, as práticas relacionadas à programação, controle e acompanhamento dos lotes. (TUBINO, 1997).

O sistema *Kanban* consiste na utilização de cartões, para controle do fluxo de materiais no processo, esses itens, geralmente de papelão, contém informações relevantes do produto, entre eles, número de identificação da peça, local para armazenamento, local de consumo, além de especificações relacionadas ao fornecedor. (WERKEMA, 2006).

A Figura 1 representa o funcionamento do sistema Kanban, com a descrição de cada processo descrito a seguir (WERKEMA, 2006).



Fonte: Adaptado de (WERKEMA, 2006).

1. Um trabalhador do próximo processo conduz os cartões *Kanban* de retirada do produto do processo anterior do supermercado. Cada lote possui um cartão de identificação;
2. Quando o trabalhador retira o material do supermercado, o cartão *Kanban* é associado ao posto de produção, retirado do lote anterior;
3. O *Kanban* do posto de produção é substituído pelo *Kanban* referente à produção;
4. Conforme o lote é utilizado no processo seguinte, o *Kanban* de retirada é utilizado, em detrimento ao de produção;
5. No processo anterior descrito, as peças são manufaturadas no momento de chegada dos *Kanbans* relacionados à produção;
6. Os *Kanbans* e os produtos associados à eles são transportados juntos durante o processo;
7. Por fim, os produtos são alocados no supermercado, com seu *Kanban* respectivo.

2.3.2 JUST IN TIME

A técnica do JIT está relacionada às questões administrativas, atuando em diversos tópicos da empresa, entre eles, na gestão da qualidade, projeto produtivo, organização do trabalho, materiais utilizados, recursos humanos e espaço físico. Seu principal objetivo é a melhoria e aprimoramento dos processos presentes na produção, reduzindo acúmulos e necessidades de estoques, que costumam ocultar outros desperdícios. (CORRÊA; GIANESI, 2009).

Segundo os autores, os estoques são mantidos a fim de evitar três grupos principais de problemas, descritos nos tópicos a seguir:

- I. Problemas de quebra de máquina: Ao enfrentar problemas no maquinário, com quebras necessitando parar a produção, os processos seguintes e dependentes da máquina suspensa são afetados e deficitários, cenário que pode ser contornado por haver estoques, cobrindo a produção até que a máquina esteja apta a voltar a produzir;
- II. Problemas de setup: Para começar a produção, há a necessidade da preparação da máquina, acarretando em custos, entre eles, mão de obra para programação, período inoperante do maquinário, perda de materiais no início da produção e tempo perdido

que poderia ser empregado em uma outra função. Para compensar essas perdas, a produção é realizada em grandes lotes, gerando estoques;

- III. Problemas de qualidade: Quando os produtos sofrem com problemas de qualidade e defeitos, o estoque entra para cobrir déficits e não interromper os demais processos produtivos, independente das atividades que serão exigidas nos produtos não conformes, como mão de obra de manutenção ou descarte do mesmo.

Ao se deparar com esses problemas, há um conflito entre a adoção do JIT, que tem como principal ideia a eliminação dos estoques, tratando o mesmo de forma nociva à empresa, devido ao alto investimento em materiais para produção, espaços físicos avantajados para alocar produtos e ocultar problemas e desperdícios na cadeia de produtividade (CORRÊA; GIANESI. 2009).

A técnica do JIT exige uma mudança de mentalidade de gestão, onde os insumos chegam à linha de produção na hora certa e na quantidade certa, produzindo apenas o necessário sob demanda, dando importância também à manutenção preventiva, projetar estimativas de materiais utilizados na produção, com responsabilidade no acerto evitando desperdícios, aumentando a confiabilidade e produtividade da empresa (CORRÊA; GIANESI. 2009).

2.3.3 MAPA DE FLUXO DE VALOR

O Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) é mais do que uma técnica na gestão de empresas líderes. Ela traduz respeito aos clientes e acionistas que não aceitam pagar os custos do desperdício (MOREIRA, 2005, p. 4).

Segundo Shook e Rother (1998), o MFV, é uma ferramenta de aplicação simples, que tem como intuito identificar e determinar o valor durante o processo para a PE, as principais vantagens da ferramenta, conforme os autores, são as seguintes:

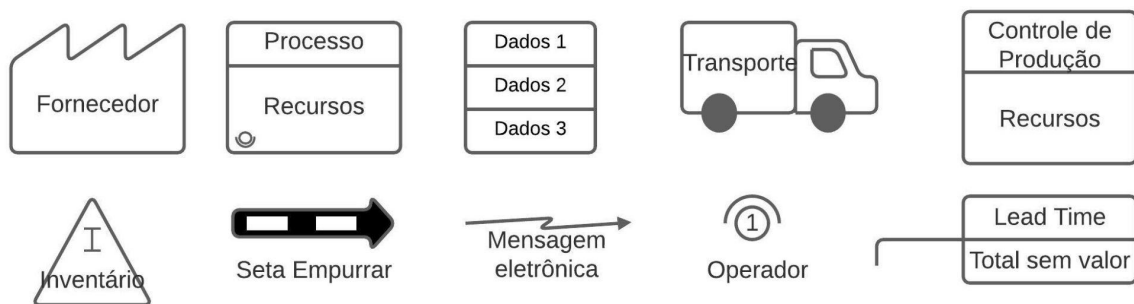
- I. Clarear os processos individuais, determinando seus fluxos conjuntos;
- II. Determinar as fontes de desperdícios durante o fluxo de valor;
- III. Aplicar as ferramentas do LM nos processos de forma conjunta, em detrimento às aplicações individuais;

IV. Determinar o MFV, inspecionando as etapas produtivas, melhorando-as quando necessário, para alcançar a PE.

Esta ferramenta é essencial para análise ampla do chamado, chão de fábrica, onde estão localizados os principais desperdícios durante o processo produtivo. Com o intuito de melhorias contínuas dos fluxos de valor determinados, sua estratégia é atacar as principais perdas encontradas e suas ocorrências. (FERRO, 2005).

Para produção de um MFV, utilizou-se ao software LucidChart, onde seus componentes são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Componentes utilizados no MFV



Fonte: Própria (2021).

2.3.4 KAIZEN

O emprego do sistema *Kaizen* consiste em melhorias contínuas em processos individuais ou no fluxo de valor como um todo, com foco em determinadas áreas, como por exemplo, quando as fontes de desperdícios são explícitas, baixo risco de implementação, necessidade de resultados imediatos, incrementar velocidade nos processos, melhoria gradual em todas etapas do projeto, entre outros cenários encarados na empresa. (WERKEMA, 2006).

Segundo Werkema (2006), o sistema deve ser implementado como é descrito nos tópicos a seguir:

- I. A equipe toda deve estar bem alinhada com os interesses e objetivos para a aplicação do sistema *Kaizen*, trabalhando de forma integral durante 3 a 5 dias;
- II. É essencial que o escopo do projeto seja definido de maneira precisa;
- III. Os dados necessários para implementação do projeto, devem ser coletados previamente à aplicação do modelo *Kaizen*;

- IV. Todas as decisões e atividades sugeridas devem ser implementadas durante o período de duração do evento *Kaizen*, as quais não sejam possíveis terminar, que sejam finalizadas em um prazo limite de 20 dias;
- V. Todas as áreas de suporte devem estar disponíveis durante esse prazo, entre elas, manutenção, recursos humanos, marketing, ouvidoria, entre outras.

2.4 DIFICULDADES PARA IMPLEMENTAR O LEAN MANUFACTURING

Apesar de todos os benefícios citados acerca do Lean Manufacturing, existem dificuldades e complicações atreladas ao tema, haja vista a suscetibilidade à eventos que fogem do controle da indústria, por exemplo *blackouts*, paralisando a linha de produção por longos períodos tempo, prejudicando toda a programação e agenda produtiva, desastres naturais causando danos às instalações e comprometendo a dinâmica e agilidade do trabalho.

Além dos eventos que fogem do controle industrial, eventuais resistências internas podem ocorrer, desde seus funcionários adaptados ao modelo de trabalho tradicional e resistentes à novas técnicas e mudanças, até a dificuldade em alinhar às novas ideias e requisitos com os atuais fornecedores, devido às necessidades da produção puxada e sua aversão a estoques.

2.5 PROCESSO DE MANUFATURA REVERSA

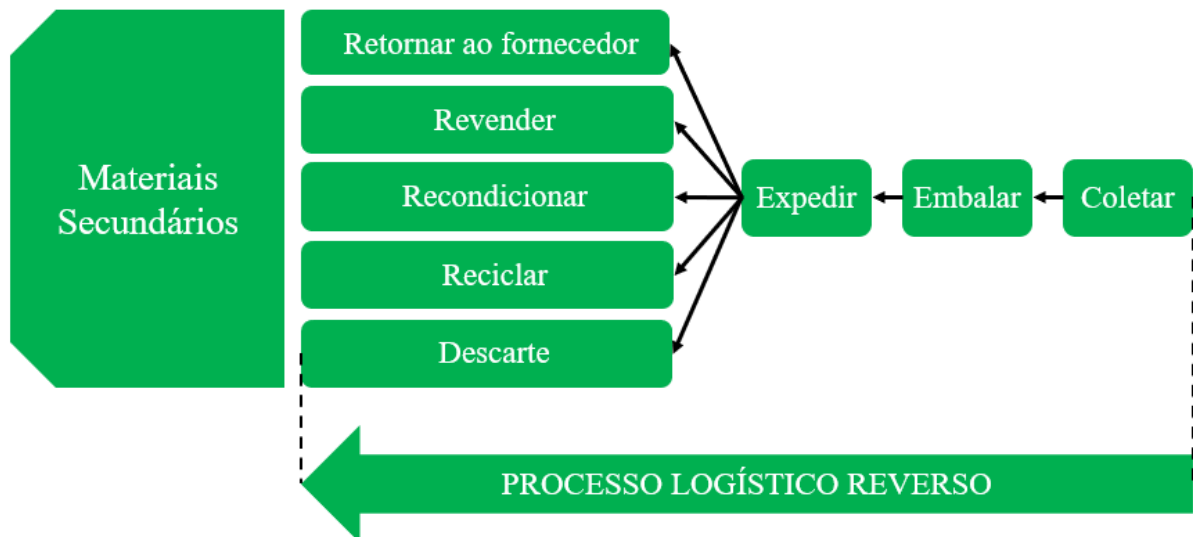
Com os processos de manufatura direta apresentados, a seguir serão exemplificadas as características da manufatura reversa², escopo e foco do trabalho em questão.

Conforme as suas necessidades, a empresa adota qual técnica se encaixa melhor no processo produtivo, seja a manufatura direta, mais comumente usada, ou a manufatura reversa, partindo de um produto final, passando-o por uma sequência de processos, subprocessos, atividades e tarefas, a fim de alcançar outros materiais que compõem o produto em questão. Onde há o retorno do produto final à sua origem, ou seja, do consumidor final ao seu produtor, destinando de forma correta e responsável ambientalmente o material. A Figura 3 representa o modelo de remanufatura.

² O processo de reciclagem de LIB é o objeto de estudo do presente trabalho. Considerou-se como Manufatura reversa, o escalonamento industrial do processo de reciclagem desenvolvido em laboratório.

“A Logística Reversa cuida dos fluxos de materiais que se iniciam nos pontos de consumo e terminam nos pontos de origem, com o objetivo de recapturar valor ou de disposição final (...). Esse processo reverso é formado por etapas características, envolvendo intermediários, pontos de armazenagem, transporte, esquemas financeiros, etc.” (NOVAES, 2007, p. 53-54).

Figura 3 – Canais reversos de revalorização



Fonte: Adaptado de (ROGERS & TIBBEN-LEMBKE, 1999).

2.6 EMPRESA ENERGY SOURCE

A empresa Energy Source - Tecnologia Sustentável, localizada em São João da Boa Vista - São Paulo, fundada em 2016 tem como foco a difusão de LIB, através do processo second-life, realizando o processo de remanufatura em baterias descartadas (ENERGY SOURCE, 2021).

2.6.1 DETALHES DO PRODUTO

O processo começa à base de uma análise e descaracterização rigorosa dos componentes presentes na bateria, determinando quais componentes poderão ou não serem reaproveitados, a segunda etapa consiste em recuperar a bateria, seguindo protocolos de segurança previamente definidos. Sua última etapa consiste em prepará-lo para voltar ao mercado, fechando o ciclo second-life (ENERGY SOURCE, 2021).

Todas as baterias utilizadas no processo são compostas por células, as células não reaproveitadas no second-life são as quais serão utilizadas para o estudo deste trabalho, passando por um processo de reciclagem, onde as células são reaproveitadas para dar origem a matéria-prima para um novo produto (ENERGY SOURCE, 2021).

2.6.1.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PRODUTO

Tabela 1 – Especificações técnicas da bateria

Capacidade da bateria	24 V 120 Ah
Descarga máxima constante	45 A (1.165 W)
Carga nominal	24 A
Tensão de carregamento	30 - 32 V
Tensão nominal	25,9 V
Tensão máxima - Corte automático	29,4 V
Tensão mínima - Corte automático	21 V

Fonte:(ENERGY SOURCE, 2021).

3 METODOLOGIA

O trabalho visa apresentar um *layout* de produção, respeitando os limites produtivos e suas características, através de simulações com dados reais e tomadas de decisão baseadas em ferramentas da PE, a fim de maximizar a produção e reduzir os desperdícios. Inicialmente, foi executado o arranjo utilizado durante a pesquisa em laboratório, analisando eventuais gargalos produtivos e buscando soluções para tais limitações, com o intuito de expansão para aplicação e demanda industrial.

Para realizar as simulações e análise de seus resultados, foi utilizado o *software* Tecnomatix™ da Siemens, representando fielmente aspectos presentes em cenários reais, possibilitando assim avaliar sua capacidade, oferecendo menos riscos à empresa em sua implementação, possibilitando alterações e manipulações de sua linha produtiva previamente.

Os resultados próximos da realidade se dão por meio da entrada de dados reais e corretos referente aos processos implementados na simulação, com relação à entrada dos

produtos, capacidade quantitativa e tempo associado a cada processo durante a manufatura, neste caso particular, na remanufatura do produto. O *software* permite a simulação no plano 2D e no 3D, permitindo a visualização das atividades dos trabalhadores nos produtos, espaço percorrido por eles e demais indicadores de desempenho operacional.

3.1 MÉTODO DE PESQUISA

Para alcançar os objetivos traçados pelo trabalho, foram necessários métodos de pesquisa definidos e estruturados, para o sucesso na fase de preparação e execução do projeto. Os itens a seguir descrevem as atividades realizadas.

- Determinar os conceitos e técnicas empregados referentes ao LM que seriam utilizados para alcançar resultado satisfatório;
- Pesquisar e elencar os processos que possuem prioridade e maior relevância no sistema produtivo, compreendendo suas necessidades e capacidades;
- Trabalhar em prol de um fluxo contínuo produtivo, manejando os processos e as células produtivas a fim de alcançar um arranjo adequado.

3.1.1 FASE DE PREPARAÇÃO

Antes de iniciar a fase de execução, é fundamental que haja planejamento e estruturação, para uma abordagem mais assertiva, evitando correção de rotas com o trabalho em andamento. Neste contexto, foi essencial um estudo prévio da bibliografia, do caso e da empresa, visando aplicar corretamente os conceitos e suas particularidades.

- I. Revisão bibliográfica completa sobre o assunto PE, obtendo conhecimento sólido para aplicação das técnicas com maior assertividade;
- II. Treinamento específico para manuseio do *software* de simulação TecnomatixTM da Siemens, para que fosse possível extrair o máximo da ferramenta, obtendo resultados mais condizentes com a realidade e aplicação futura.

3.1.2 FASE DE EXECUÇÃO

A fase de execução se dividiu em três etapas, a etapa de planejamento, alinhando os principais objetivos e características do trabalho. Em seguida, a etapa de construção do

modelo de produção, com a esquematização de fluxogramas entre outros recursos de modelagem. Por fim, a última etapa de simulação onde são obtidos os resultados de todo o trabalho. Todas as etapas e suas principais atividades são descritas a seguir.

Etapa de Planejamento e suas práticas:

- I. Determinação dos principais objetivos e planejamento do *layout* produtivo;
- II. Descrição de cada processo e elemento presente no *layout* laboratorial, compreendendo o produto, variáveis associadas no processo e o modelo de produção;
- III. Estudo da planta baixa da empresa, planejando as melhores rotas e disposições físicas.

Etapa de Construção e suas práticas:

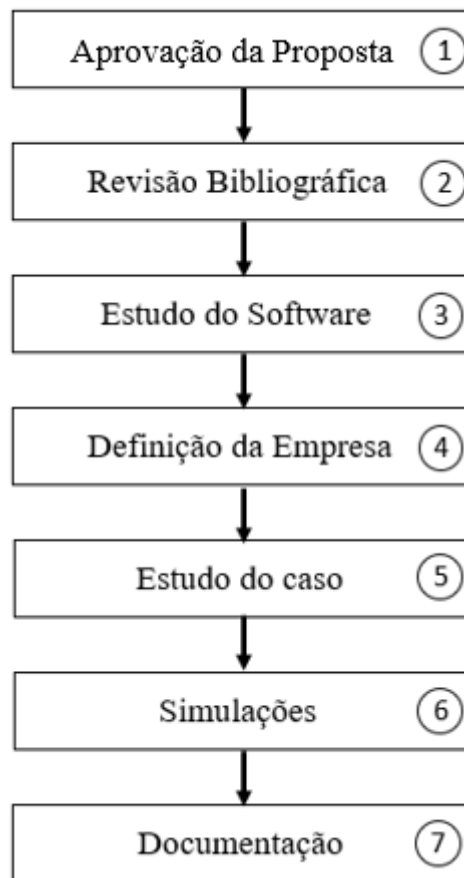
- I. Produção de fluxogramas representando todos os processos organizados de produção;
- II. Produção do *layout* prévio para implementação no *software*;

Etapa de Simulação e suas práticas:

- I. Aplicação dos *layouts* construídos na fase anterior, para análise do comportamento de cada processo individualmente e coletivamente, além da utilização das ferramentas da PE, buscando otimizações;
- II. Validação dos *layouts* com base na análise de seus resultados e métricas quantitativas e qualitativas, empregando mudanças conforme o necessário.

O trabalho desenvolvido teve duração de doze meses, desde sua aprovação, passando por uma revisão bibliográfica acerca do tema, familiarização e aperfeiçoamento ao manuseio do *software*, estudo de caso referente à empresa e sua linha produtiva, até as simulações e documentação do Trabalho de Conclusão de Curso. As etapas descritas estão dispostas no fluxograma a seguir na Figura 4, bem como suas especificações e detalhes.

Figura 4 – Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: Própria (2021).

1. Aprovação da Proposta: Momento onde foi definido o tema abordado no projeto, assim como suas características e objetivos gerais acerca do assunto.
2. Revisão Bibliográfica: Etapa na qual foi realizada uma pesquisa aprofundada por toda bibliografia sugerida, a fim de compreender e criar embasamento teórico quanto ao tema da PE. Paralelamente, foi desenvolvida a parte escrita da Revisão Bibliográfica do documento.
3. Estudo do *Software*: Ponto de primeiro contato com o *software* de simulação utilizado, o Tecnomatix™ da Siemens, onde foram conhecidas as principais ferramentas e seu funcionamento básico. Com o avanço do trabalho, pôde-se estar cada vez mais habituado às suas características e funcionalidades.
4. Definição da Empresa: Etapa na qual definiu-se a empresa que teria sua linha de produção estudada e aprimorada, a Energy Source - Tecnologia Sustentável,

localizada em São João da Boa Vista. A linha em questão realiza a reciclagem de LIB.

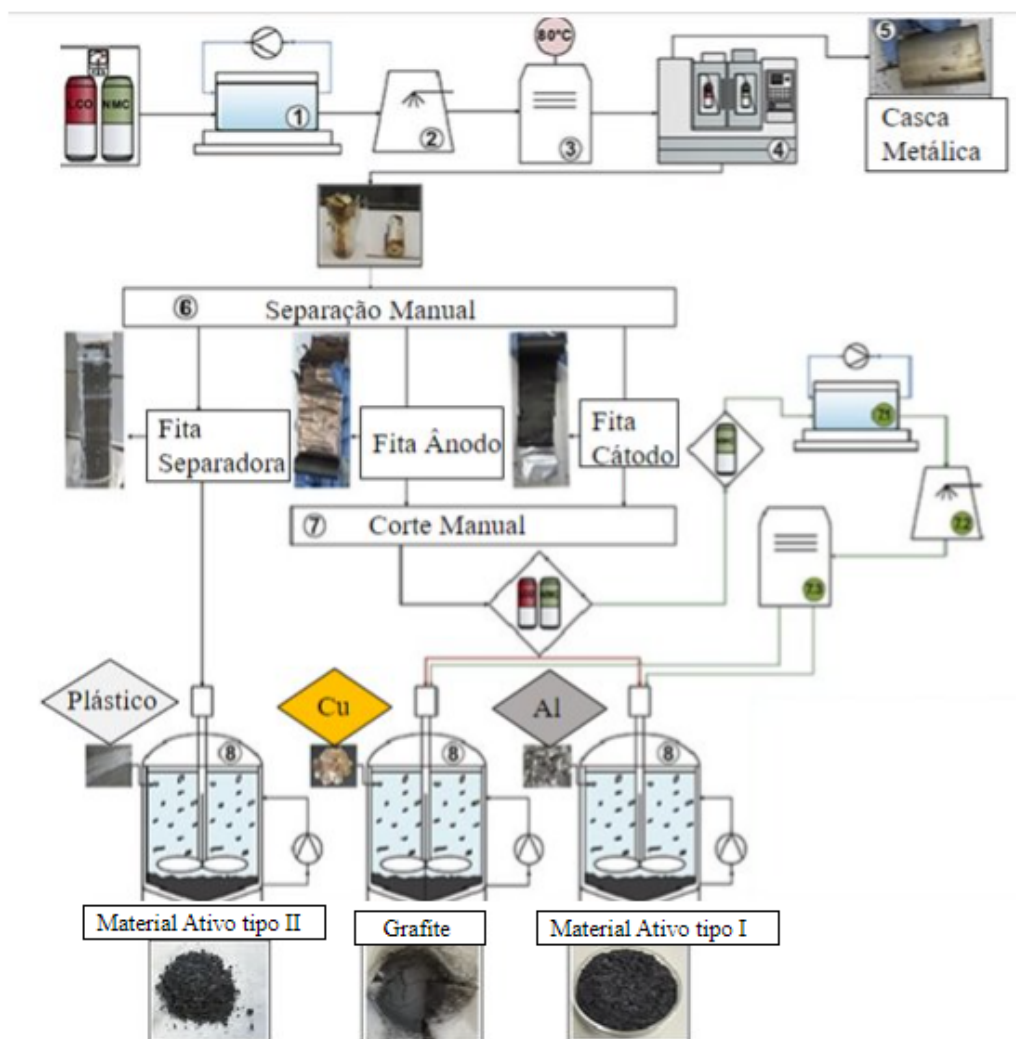
5. Estudo do caso: Foram levantados os dados relativos a todos os processos produtivos referentes à linha de produção da empresa, bem como suas características, funções, tempos de operação, tempos de *setup*, mapeamento da planta baixa, entre outras propriedades, que serão detalhadas nos próximos tópicos.
6. Simulações: Com o embasamento teórico adquirido nas fases anteriores, domínio do *software* e entendimento dos processos da empresa, foram realizadas as simulações de cenários propostos no *software* Tecnomatix™ da Siemens, partindo do cenário laboratorial fornecido pela empresa, chegando no modelo final industrial, com suas melhorias baseadas nas ferramentas da PE.
7. Documentação: Parte final do trabalho, ocorre após validação dos resultados obtidos pelas simulações e apresentação à empresa do modelo final sugerido, com escala industrial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DO ARRANJO

Durante o estudo do caso, foram especificados os processos presentes na linha de produção, os quais estão representados nos fluxogramas a seguir, baseado no mapeamento laboratorial da empresa. No caso estudado, existe uma particularidade nas LIB, sua composição química, sendo classificadas em dois grupos, um deles representa as baterias compostas por lítio, manganês, cobalto e níquel (NMC), e o segundo grupo pelas quais possuem composição de óxido de lítio e cobalto (LCO). O fluxograma é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma laboratorial de remanufatura de baterias



Fonte: Adaptado de (SANTOS *et al.*, 2021).

1. *Recirculation Bath* (Banho de Recirculação): Processo supervisionado por um funcionário no setor. Nesta etapa as baterias passam por um fluxo de recirculação de cloreto de sódio (NaCl) ou sulfato de magnésio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), para sua descarga. Com duração de 12 horas por batelada.
2. *Water Bath* (Banho de Água): Processo supervisionado por um funcionário do setor. As baterias passam por um banho de água para eliminar os resíduos provenientes da etapa anterior. Com duração de 30 minutos por batelada.
3. *Oven* (Secagem): Processo supervisionado por um funcionário no setor. O lote é conduzido a um forno e aquecido até aproximadamente 80 °C, para secar o material. Com duração de 15 minutos por batelada.

4. *Automated Slitting* (Corte Automatizado): Processo supervisionado por um funcionário no setor. As baterias passam por uma máquina de corte automatizado, onde suas cascas metálicas são retiradas. Capacidade de corte de 5000 peças por hora.
5. *Cell Disassembly* (Separação Manual): Processo realizado por um funcionário na bancada, onde são separados o cátodo, ânodo e a membrana plástica de separação entre eles. Com duração de 4:48 minutos por peça.
6. *Cutting* (Corte Manual): Processo realizado por um funcionário na máquina de corte. As folhas catódicas e anódicas são cortadas em pedaços de 2 cm de comprimento aproximadamente. Com duração de 1:12 minutos por peça.
7. *Drying Process* (Processo de Limpeza): Devido às características químicas diferentes, faz-se necessário um processo pré extração, para facilitar a remoção do óxido, das folhas metálicas, seguido de , banho e secagem. Exclusivo as baterias do tipo NMC.
 - 7.1. Fluxo de Recirculação: Processo supervisionado por um funcionário no setor. Nesta etapa as baterias passam por um fluxo de recirculação de solução levemente ácida para facilitar a remoção do óxido. Com duração de 6 horas por batelada.
 - 7.2. Banho: Processo supervisionado por um funcionário no setor. As baterias passam por um banho de água para eliminar os resíduos provenientes da etapa anterior. Com duração de 30 minutos por batelada.
 - 7.3. Secagem: Processo supervisionado por um funcionário no setor. O lote é conduzido a um forno e aquecido até aproximadamente 80 °C, para secar o material. Com duração de 15 minutos por batelada.
8. *Stirred Tank Reactors* (Tanques Reatores): Processo supervisionado por um funcionário no setor. Os materiais seguem cada um para o seu respectivo reator, onde serão adicionados a membrana plástica, o cátodo, e o ânodo, respectivamente, para realização da reação dos materiais provenientes dos processos anteriores e a solução adicionada. Com duração de 4:48 minutos por batelada.
9. Filtração: Processo supervisionado por um funcionário no setor. Para obtenção dos materiais finais de interesse, material tipo I, material tipo II e grafite, faz-se necessário filtrar os materiais obtidos após os tanques reatores. Com duração de 30 minutos por batelada.

Todas as informações referentes aos tempos de cada processo foram obtidas experimentalmente no ambiente laboratorial do *Center for Advanced and Sustainable Technologies* (CAST) da UNESP, baseadas nos estudos previamente realizados e capacidade fornecida dos equipamentos presentes na empresa Energy Source. A Tabela 2 sintetiza todas as informações descritas nos fluxogramas.

Tabela 2 – Especificação dos processos produtivos

Processos	NMC	LCO	Ação do Funcionário	Tempo de Ciclo
Banho Recirculação	Presente	Presente	Supervisão	12 h/batelada
Banho de Água	Presente	Presente	Supervisão	30 min/batelada
Secagem	Presente	Presente	Supervisão	15 min/batelada
Corte Automatizado	Presente	Presente	Supervisão	2 min/batelada
Separação Manual	Presente	Presente	Manual	4:48 min/unidade 16 h /batelada
Corte Manual	Presente	Presente	Manual	1:12 min/unidade 4 h/batelada
Banho Recirculação	Presente	Não	Supervisão	6 h/batelada
Banho de Água	Presente	Não	Supervisão	30 min/batelada
Secagem	Presente	Não	Supervisão	15 min/batelada
Reatores	Presente	Presente	Supervisão	4:48 min/batelada
Filtração	Presente	Presente	Supervisão	30 min/batelada

Fonte: Própria (2021).

Posteriormente, foi fornecida a planta baixa industrial da Energy Source, especificando os locais e disposição das células produtivas, para reprodução mais fiel e com maior riqueza de detalhes no *software* de simulação, disponível no Apêndice A.

4.2 SIMULAÇÃO

Após a validação dos tempos de ciclo de cada processo em ambiente de laboratório, iniciou-se a etapa de simulação no *software* Tecnomatix™ da Siemens, replicando os parâmetros apontados anteriormente, para um resultado mais próximo do real possível. Com a

posse da planta e conhecimento dos processos produtivos, foram iniciadas as primeiras simulações, replicando o cenário base laboratorial, a logística física da empresa, e os parâmetros apontados anteriormente, a fim de encontrar eventuais carências e aprimorar a produção como um todo, aplicando as ferramentas da PE. Em todos os cenários propostos foi realizado o MFV, a fim de analisar todo o processo produtivo de cada cenário, auxiliando na tomada de decisão para intervenções.

4.2.1 CENÁRIO INICIAL

O cenário inicial é o modelo apresentado na Figura 3, o fluxograma da linha de produção. Portanto, a simulação é baseada na configuração logística da planta e os processos produtivos representados. Foi definida uma batelada de duzentas baterias, cem do tipo NMC e cem do tipo LCO. O *Lead Time (LT)* pode ser calculado com o somatório de todos os tempos de ciclo (T_c), neste caso:

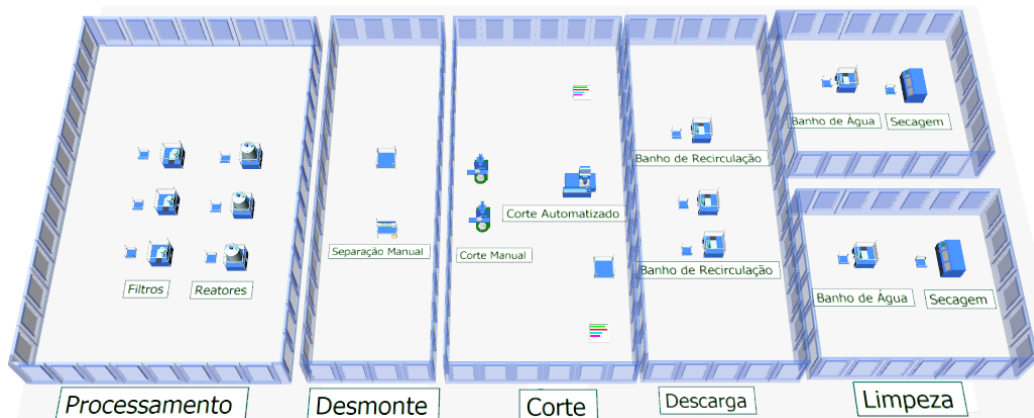
$$Lead\ Time = \sum T_c \quad (3)$$

$$Lead\ Time = 12\ h + 0,5\ h + 0,25\ h + 16\ h + 2\ h + 6\ h + 2\ h + 0,5\ h + 0,25\ h + 0,32\ h$$

$$Lead\ Time = \sum T_c \sum = 39,82\ h$$

Soma-se a isso o tempo de *setup*, definido em 30 minutos, para limpeza e preparação das máquinas, as quais não suportam contaminação devido aos tipos diferentes de bateria, chegando no LT total de 40,12 horas para o processo produtivo completo. A Figura 6, é apresentado o esquema 3D simulado.

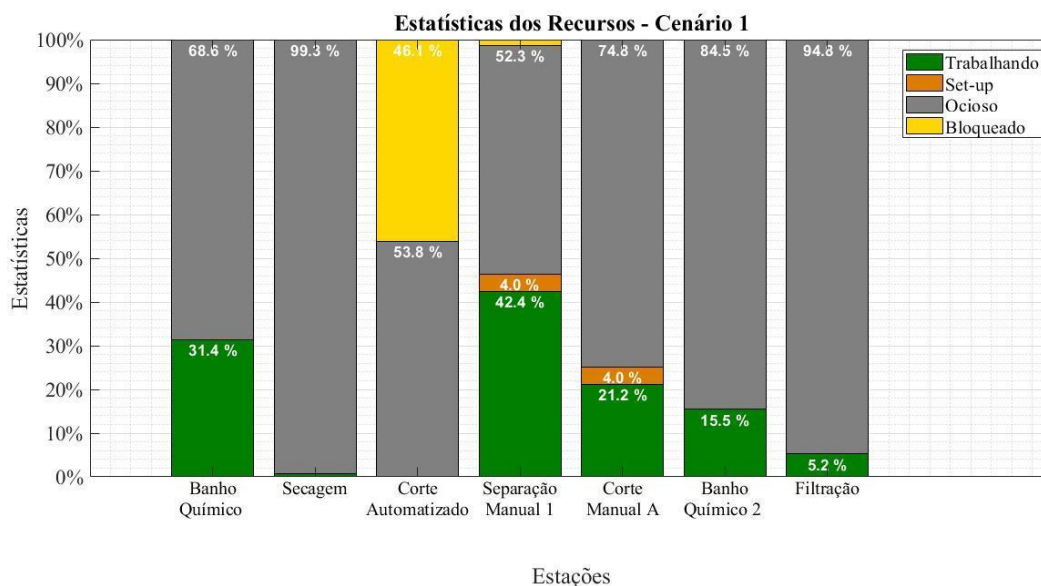
Figura 6 – Esquemático 3D do cenário 1



Fonte: Própria (2021).

O desempenho do modelo foi interpretado através da análise dos gráficos e parâmetros obtidos, os gráficos gerados foram utilizados para contabilizar e mensurar o tempo de trabalho e o tempo ocioso das operações presentes no processo produtivo.

Figura 7 Estatísticas de trabalho cenário 1



Fonte: Própria (2021).

Pela Figura 7 nota-se que o tempo ocioso das máquinas é bem superior ao tempo de trabalho, ou seja, os processos estão desperdiçando muito tempo sem agregar valor ao produto. Além disso, existe uma significativa parcela de bloqueio associada ao processo de Corte Automatizado, indicando um possível gargalo na operação seguinte, no caso, a Separação Manual. Ao analisar os tempos de trabalho, confirma-se que a Separação Manual é o principal gargalo presente no modelo, por receber as baterias cortadas a cada 0,72 segundos e repassá-las a cada 4:48 minutos, necessitando de 16 horas para concluir sua função.

Destaca-se também a necessidade de *setup* na linha de produção, nos processos de Separação Manual e Corte Manual, operações nas quais pode haver contaminação dos equipamentos e/ou bancadas devido às propriedades químicas dos materiais, necessitando de 30 minutos para limpeza e preparação para a especificação seguinte de baterias.

O cenário possibilita diversas melhorias a serem implementadas, entre elas, a eliminação do *setup*, maximização do tempo de trabalho de cada estação, aumentando o tempo na qual cada bancada agrega valor ao produto, em detrimento aos bloqueios

observados e tempos de ociosidade. Desperdícios serão naturalmente observados, apontados e corrigidos com o avanço das simulações e análise detalhada de cada operação individualmente e coletivamente. Devido à sua eficiência, a estação de Corte Automatizado possui um trabalho de 0,11 %, dificultando sua observação no gráfico.

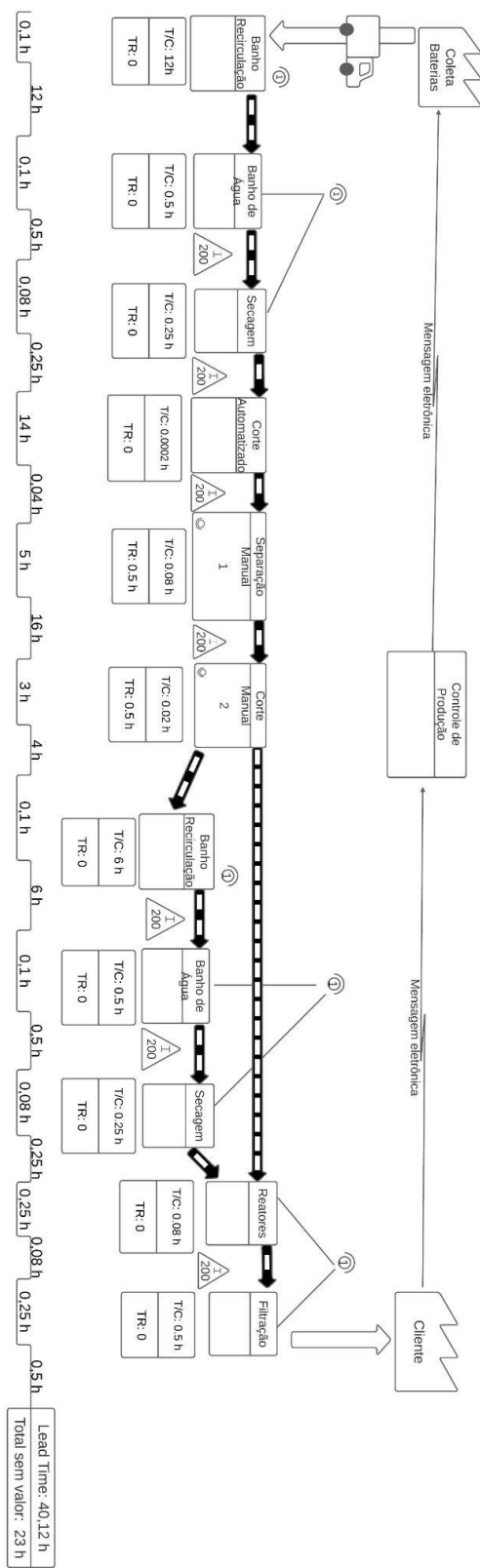
Na tabela 3 a seguir, estão dispostos os dados referentes ao tempo de trabalho, ocioso, bloqueado e *setup* de cada estação presente na linha produtiva, representados em porcentagem.

Tabela 3 – Estatísticas das estações - Cenário 1

Processos	Trabalho (%)	Ocioso (%)	Bloqueado (%)	Setup (%)
Banho Recirculação	31,36	68,64	0	0
Banho de Água	1,31	98,69	0	0
Secagem	0,66	99,34	0	0
Corte Automatizado	0,11	53,83	46,06	0
Separação Manual	42,40	52,30	1,33	3,98
Corte Manual	21,2	75,02	0	3,98
Reatores	1,05	98,95	0	0
Filtração	7,86	92,14	0	0

Fonte: Própria (2021).

Figura 8 – MFV cenário 1



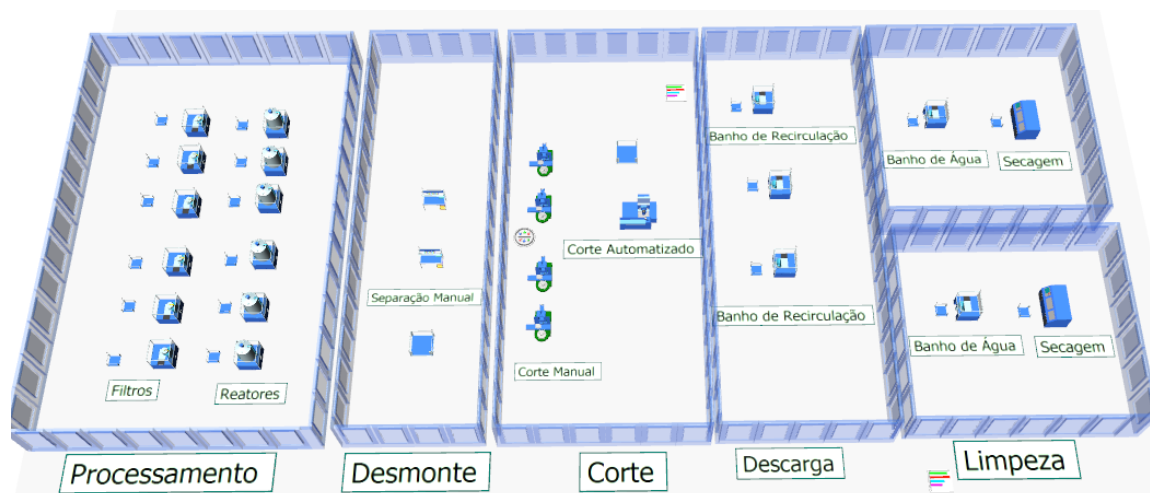
Fonte: Própria (2021).

A Figura 8 representa o MFV do cenário 1, esquematizado conforme seus processos e requisitos, com os parâmetros pré-definidos pela técnica do MFV.

4.2.2 SEGUNDO CENÁRIO

Para resolver o *setup* observado no cenário anterior, foram duplicadas as bancadas e máquinas a partir das quais eram exigidas as limpezas e preparações, modelando a linha em paralelo, um fluxo para as LIB do tipo NMC e outro fluxo para LIB do tipo LCO. Em função disso, além de eliminar o tempo em função do *setup*, o tempo de ciclo dos processos duplicados foram reduzidos, diminuindo assim, o LT. A Figura 9 apresenta o esquemático 3D do segundo cenário.

Figura 9 – Esquemático 3D do cenário 2



Fonte: Própria (2021).

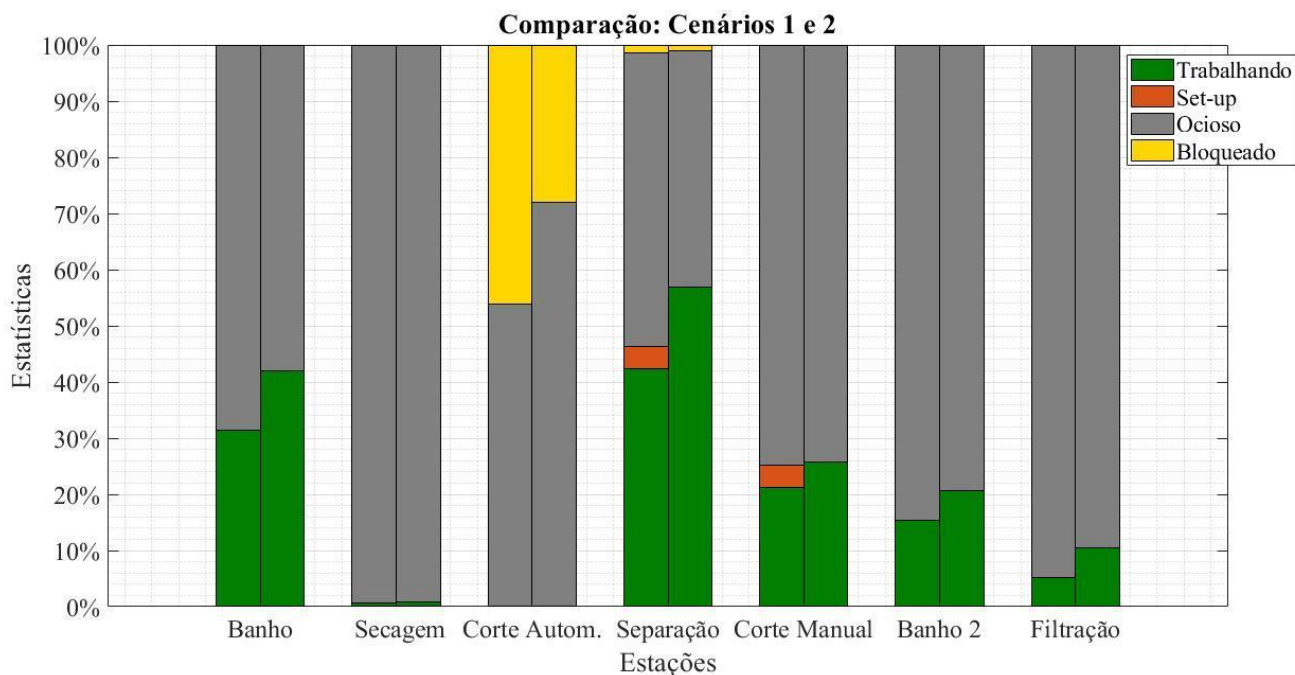
O tempo de operação das máquinas que operam em função da batelada, se manteve o mesmo, alterando apenas o tempo de ciclo os quais são baseados por unidade, no caso a Separação Manual e Corte Manual, as quais foram duplicadas com relação ao cenário anterior. O LT do segundo cenário será:

$$Lead\ Time = 12\ h + 0,5\ h + 0,25\ h + 8\ h + 6\ h + 1\ h + 0,5\ h + 0,25\ h + 0,08\ h$$

$$Lead\ Time = \sum T_c \sum c = 28,58\ h$$

Com as mudanças realizadas, o LT entre os cenários foi reduzido em 9,30 horas, correspondendo a 24,55 % de redução, oito horas em função do acréscimo de mais uma bancada de separação manual, uma hora devido a duplicação das máquinas de corte manual, e meia hora por eliminar o *setup*.

Figura 10 – Comparativo de trabalho cenários 1 e 2



Fonte: Própria (2021).

No gráfico comparativo entre o primeiro e segundo cenário, apresentado na Figura 10, nota-se que o tempo de trabalho em cada estação é maior na segunda coluna, a qual representa a otimização implementada, esse aumento se dá pela divisão das tarefas, reduzindo o tempo total de produção, e aumentando a proporção na qual cada estação está agregando valor ao produto.

Além disso, observa-se que as faixas referentes ao tempo de *setup* foram eliminadas, revertendo esse tempo para trabalho efetuado pelas estações e trabalhadores, tendo em vista que essas bancadas são de trabalho manual.

Na tabela 4, são apresentadas as novas estatísticas de cada estação na linha de produção.

Tabela 4 – Estatísticas das estações - Cenário 2

Processos	Trabalho (%)	Ocioso (%)	Bloqueado (%)	Setup (%)
Banho Recirculação	42,04	57,96	0	0
Banho de Água	1,76	98,24	0	0
Secagem	0,88	99,12	0	0
Corte Automatizado	0,14	71,86	27,99	0
Separação Manual	56,84	42,08	1,08	0
Corte Manual	25,7	74,3	0	0
Reatores	1,38	98,62	0	0
Filtração	10,56	89,44	0	0

Fonte: Própria (2021).

Observa-se que a estação de Separação Manual permanece como o maior gargalo presente na linha de produção, devido ao elevado bloqueio encontrado no Corte Automatizado, sendo um limitante para toda a linha produtiva.

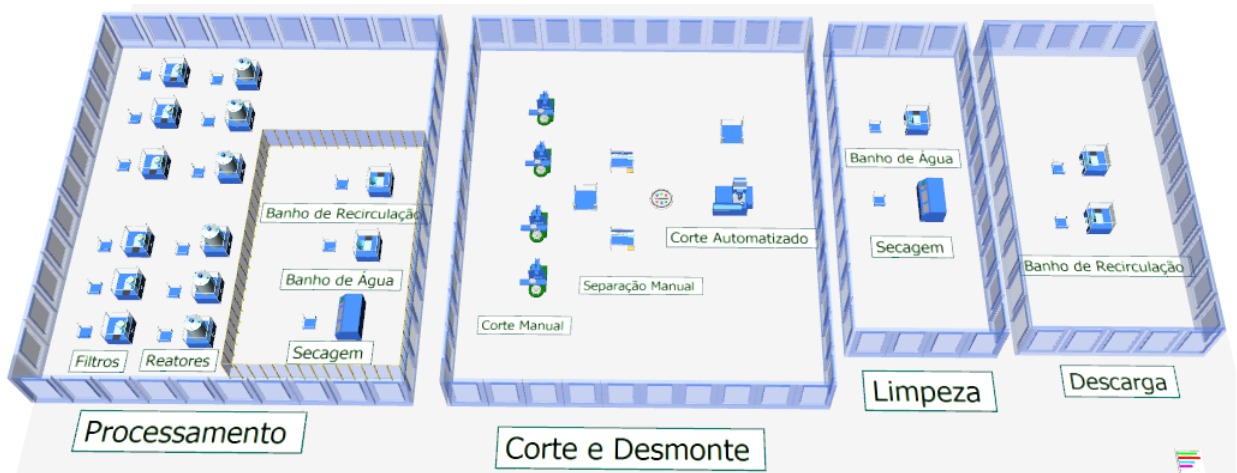
4.2.3 TERCEIRO CENÁRIO

Como mencionado anteriormente, foi observada uma deficiência no posicionamento das células produtivas, acarretando movimentos desnecessários, desperdícios por transporte e indo contra o conceito de uma produção puxada, seguindo o fluxo produtivo de forma fluída. A otimização realizada no terceiro cenário foi nessa linha de raciocínio, realizando alterações na planta base fornecida, alterando o posicionamento dos processos de Banho de Recirculação, Banho de Água, Secagem, Separação Manual e Corte Manual, com essa alteração, a linha opera de forma mais direta e sucessiva. O esquemático 3D produzido para este cenário será apresentado pela Figura 11.

O LT do terceiro cenário, após as alterações físicas no *layout* será:

$$Lead\ Time = \sum T_c \sum c = 28,08\ h$$

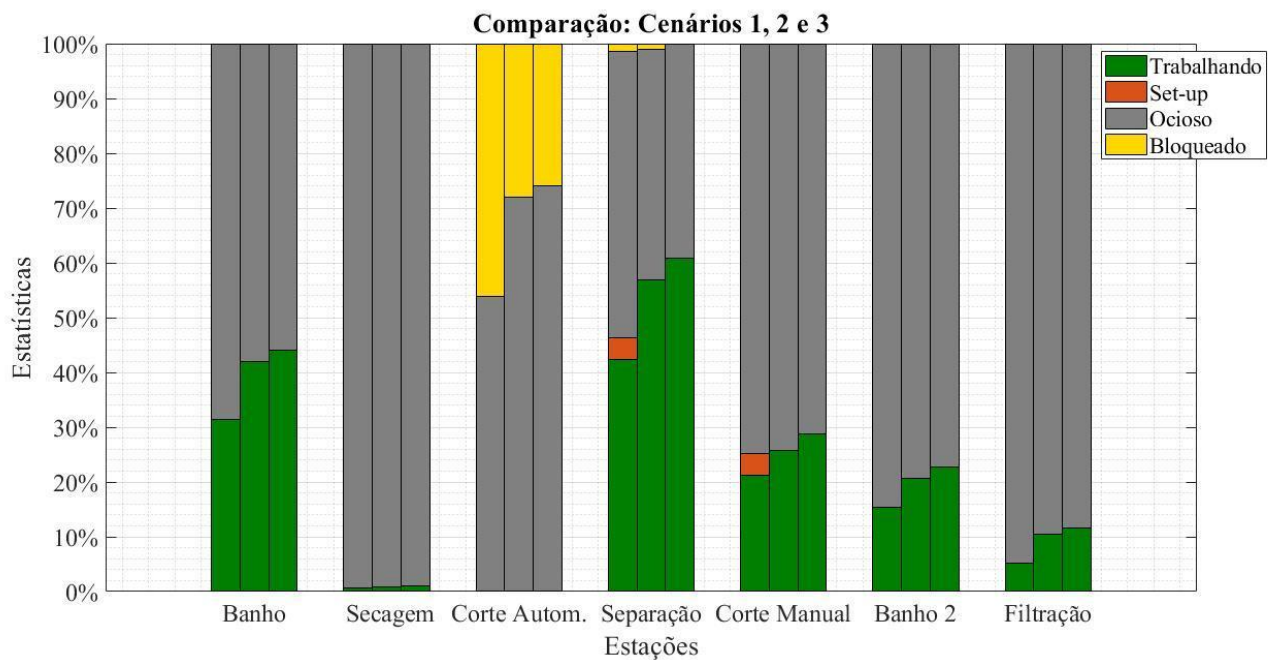
Figura 11 – Esquemático 3D do cenário 3



Fonte: Própria (2021).

Com a eliminação dos desperdícios causados por movimentos desnecessários, perdas relacionadas a transporte, os processos foram otimizados de forma gradual em toda a linha, como pode ser observado no gráfico de trabalho comparativo na Figura 12, entre os três cenários propostos até então. O destaque vai para a eliminação do bloqueio na bancada de Separação Manual.

Fig. 12 – Comparativo de trabalho cenários 1, 2 e 3



Fonte: Própria (2021).

4.2.4 QUARTO CENÁRIO

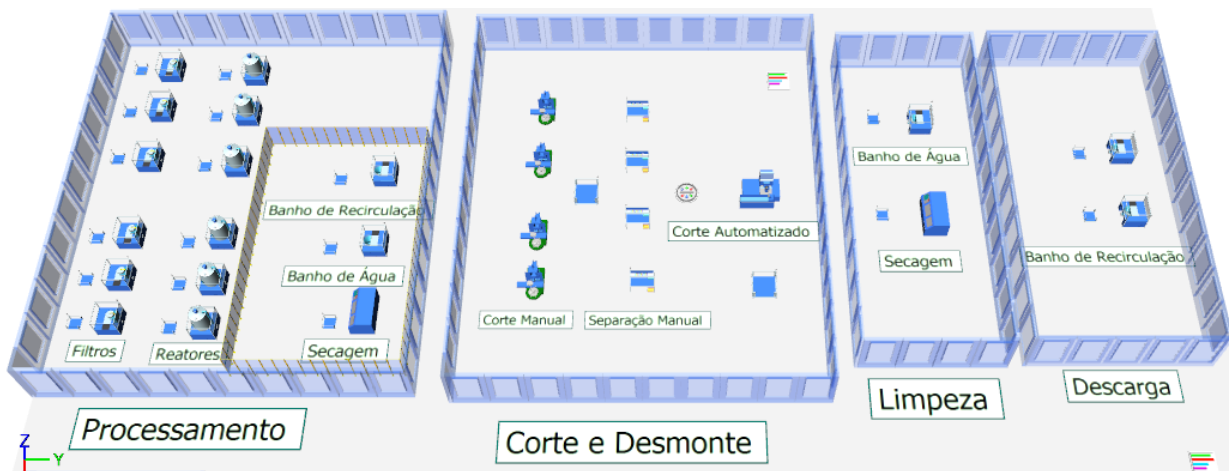
No quarto cenário proposto, a otimização implementada foi duplicar as estações de Separação Manual existentes, totalizando neste momento quatro bancadas. Com esta medida, o LT foi reduzido, devido à diluição de baterias para cada processo, causando menor bloqueio no processo anterior, no Corte Automatizado. Além da redução de bloqueio, o LT total alcançado foi de:

$$Lead\ Time = 12\ h + 0,5\ h + 0,25\ h + 4\ h + 6\ h + 1\ h + 0,5\ h + 0,25\ h + 0,08\ h$$

$$Lead\ Time = \sum T_c \Sigma = 24,58\ h$$

As 24,58 horas de LT correspondem a uma redução de 13 horas com relação ao cenário inicial, reduzindo 35,11 % o tempo de produção de uma mesma batelada em questão, além da ausência de *setup*, já resolvido desde o segundo cenário proposto. O esquemático 3D vem a seguir na Figura 13.

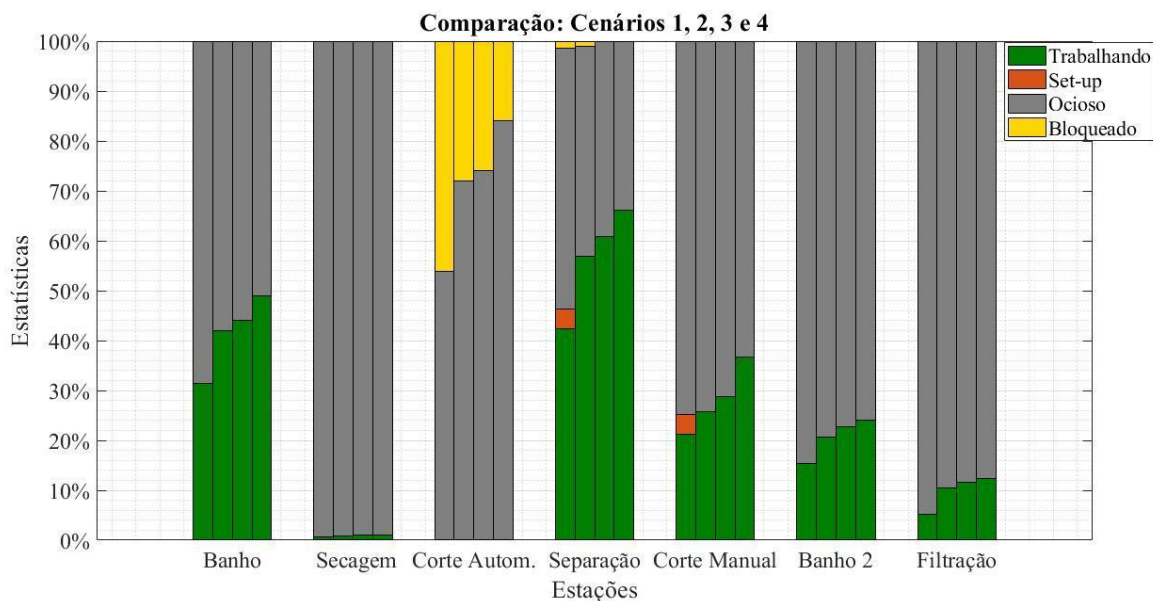
Figura 13 – Esquemático 3D do cenário 4



Fonte: Própria (2021).

No quarto cenário, manteve-se os conceitos comentados no cenário anterior, evitar desperdícios devido aos movimentos desnecessários e perdas por transporte, além de implementar a produção puxada. O gráfico comparativo entre os quatro cenários propostos é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Comparativo de trabalho cenários 1, 2, 3 e 4



Fonte: Própria (2021).

Observa-se que todas as estações estão trabalhando por um tempo maior, proporcionalmente ao LT da linha, além da redução do bloqueio na estação de Corte Automatizado, em 11,85 %. Analisando o principal gargalo observado, a Separação Manual, as quatro estações conjuntas passam mais tempo agregando valor ao produto 9,36 % a mais, um aumento significativo, comparado aos 23,8 % do primeiro cenário, contra 66,20 % atuais.

Tabela 5 – Estatísticas das estações - Cenário 4

Processos	Trabalho (%)	Ocioso (%)	Bloqueado (%)	Setup (%)
Banho Recirculação	48,95	51,05	0	0
Banho de Água	2,05	97,95	0	0
Secagem	1,02	98,98	0	0
Corte Automatizado	0,17	83,89	16,14	0
Separação Manual	66,2	33,8	0	0
Corte Manual	36,76	63,24	0	0
Reatores	1,62	98,38	0	0
Filtração	12,3	87,7	0	0

Fonte: Própria (2021).

A tabela 5 apresenta os dados estatísticos de cada estação de trabalho presente na linha, neste cenário em questão, não há *setup* em qualquer estação e o menor bloqueio apresentado até então no Corte Automatizado.

4.2.5 QUINTO CENÁRIO

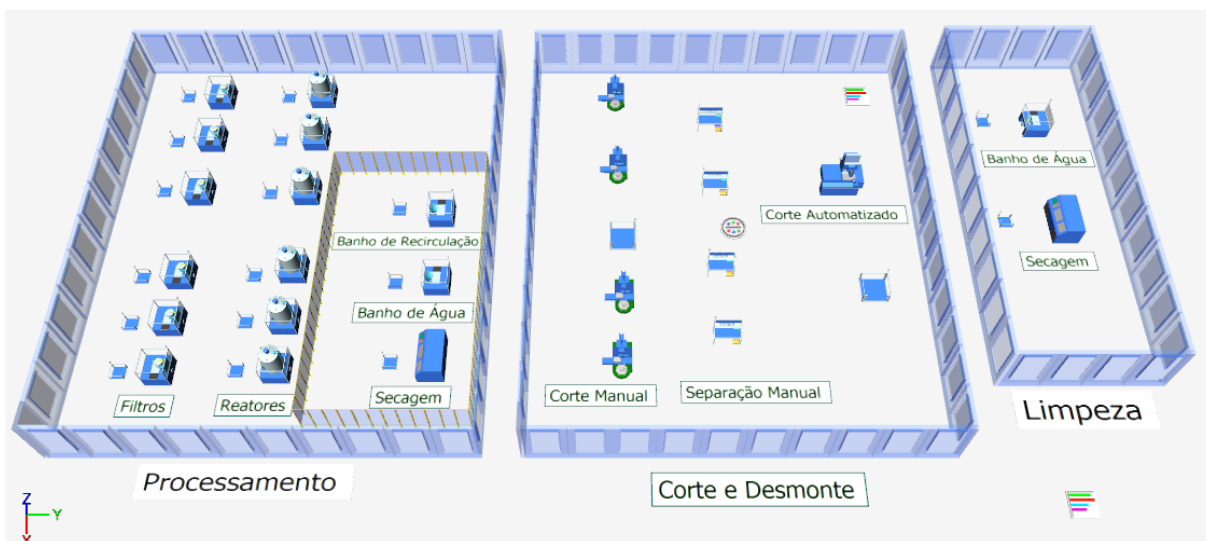
No quinto e último cenário, a otimização se deu pela retirada do Banho de Recirculação inicial da linha de produção, alocando-o como atividade exercida por outro setor da empresa, sendo retirado da linha produtiva em questão. Como observado anteriormente, a estação correspondia a 48,82 % do LT total, um fator extremamente limitante e desproporcional aos demais processos presentes na linha. Com esta atitude, o LT da linha será:

$$Lead\ Time = 0,5\ h + 0,25\ h + 0,04\ h + 4\ h + 6\ h + 1\ h + 1\ h + 0,5\ h$$

$$Lead\ Time = \sum T_c \sum = 13,29\ h$$

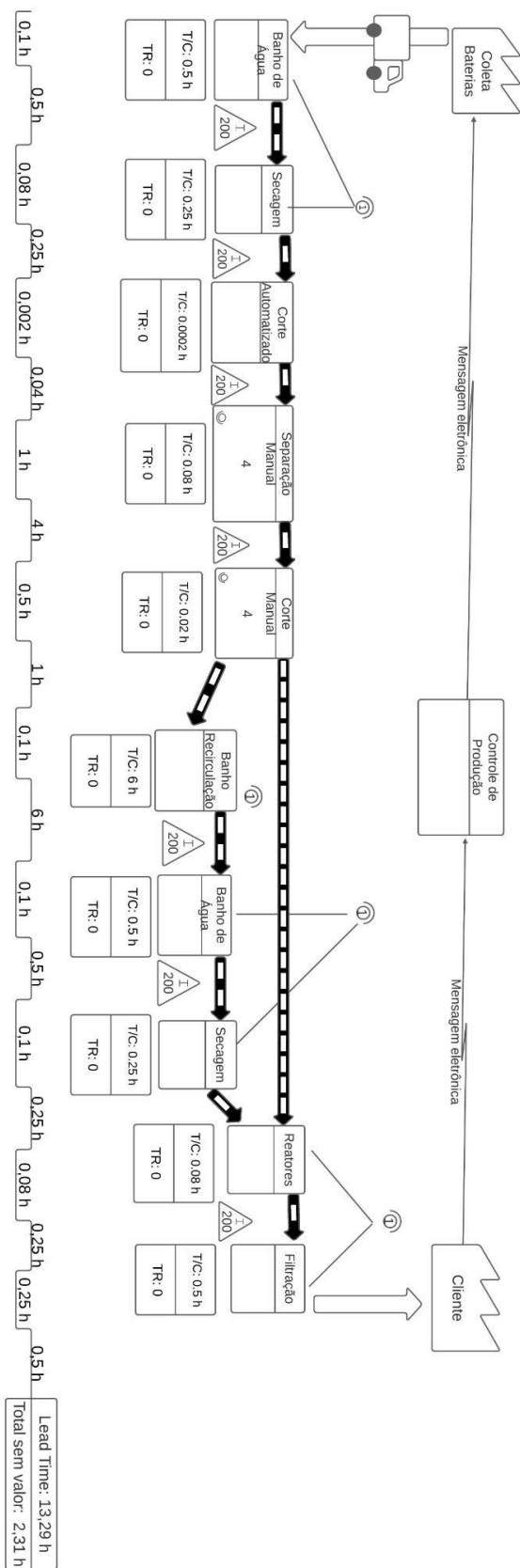
Com o corte da estação da linha, o LT entre o primeiro cenário e o último, foi reduzido em 25,30 horas, 66,78 % de redução, um número absoluto extremamente significativo. Os processos desta maneira estão mais uniformes e fluidos. Como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Esquemático 3D do cenário 5



Fonte: Própria (2021).

Figura 16 – MFV cenário 5

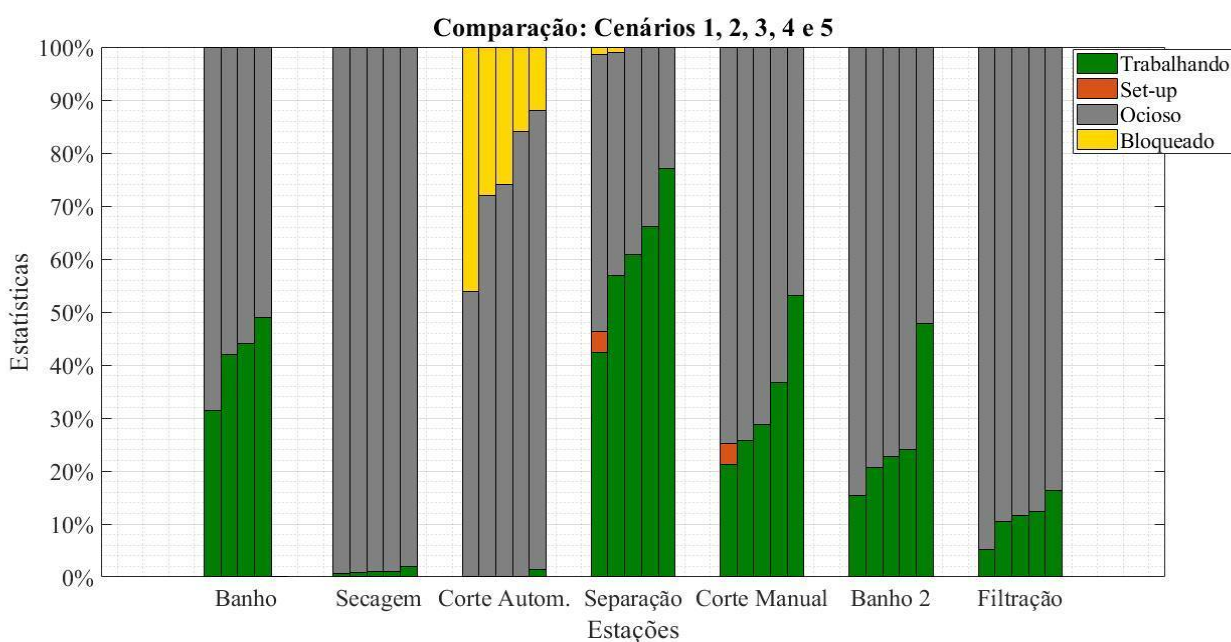


Fonte: Própria (2021).

Na Figura 16, que apresenta o MFV do cenário 5, observa-se a redução no Lead Time e no tempo ocioso entre os processos, devido às alterações e otimizações realizadas em cada cenário até o modelo atual.

Destacam-se que diversas ferramentas do LM foram utilizadas até alcançar este modelo final, entre elas, foram cortados desperdícios causados pelas movimentações desnecessárias, processos desnecessários, por espera e transporte, além da implementação da produção puxada, auxiliada pelo emprego do modelo Kaizen e Kanban.

Figura 17 – Comparativo de trabalho cenários 1, 2, 3 e 4



Fonte: Própria (2021).

No diagrama de barras apresentado na Figura 14, os tempos de trabalho de cada estação foram otimizados, reduzindo de forma abrupta os valores ociosos, não há *setup* desde o segundo cenário. O percentual de bloqueio presente no Corte Automatizado foi reduzido em 3,88 %, minimizando o gargalo observado na Separação Manual, comparando-as, houve um aumento no trabalho das bancadas de separação de 10,82 %. Além disso, pode-se observar um comportamento de escada no parâmetro de trabalho no gráfico de barras, indicando melhorias a cada cenário implementado. No eixo das estações, o Banho possui apenas quatro barras devido à retirada do Banho de Recirculação do cenário 5.

Tabela 6 – Estatísticas das estações - Cenário 5

Processos	Trabalho (%)	Ocioso (%)	Bloqueado (%)	Setup (%)
Banho de Água	4,06	95,94	0	0
Secagem	2,03	97,97	0	0
Corte Automatizado	0,33	67,61	32,06	0
Separação Manual	77,02	22,98	0	0
Corte Manual	53,02	46,96	0	0
Reatores	3,24	96,76	0	0
Filtração	16,24	83,76	0	0

Fonte: Própria (2021).

Nota-se na tabela 6, apresentando os dados estatísticos do *layout* de modelo final, a maior porcentagem associada de trabalho para cada processo da linha produtiva, onde todas as estações tem o menor tempo ocioso apresentado.

4.3 COMPARATIVO

Com posse de todos os dados de cada cenário, otimizações e alterações realizadas, montou-se a Tabela 7, preenchida com os valores absolutos de variação entre o primeiro cenário e o último, validando o modelo final, para os parâmetros de trabalho, ocioso, *setup* e bloqueio, todos em porcentagem.

Tabela 7 – Variação dos parâmetros Modelo Final

Processos	Trabalho (%)	Ocioso (%)	Bloqueado (%)	Setup (%)
Banho de Água	+2,75	-2,96	0	0
Secagem	+1,37	-1,37	0	0
Corte Automatizado	+0,22	-13,78	-14	0
Separação Manual	+34,62	-29,32	-1,33	-3,98
Corte Manual	+31,82	-28,06	0	-3,98
Reatores	+2,19	-2,19	0	0
Filtração	+8,35	-8,38	0	0

Fonte: Própria (2021).

Nota-se que a maior variação obtida foi no principal gargalo da linha produtiva, na Separação Manual, com aumento de 34,62 % no trabalho realizado. Com a otimização da bancada anterior, o Corte Manual foi maximizado, aumentando 31,82 % seu trabalho, confirmando a limitação causada anteriormente pelo processo de Separação Manual. Destaca-se também a redução significativa do bloqueio no Corte Automatizado, decorrente da otimização citada.

O LT prévio, com todos os tempos de ciclo somados ao *setup* era de 37,88 horas, após todas as otimizações sugeridas, foi alcançado um LT de 12,58 horas, reduzindo em 66,78 % o tempo total de produção.

Respeitando os limites físicos da planta da fábrica, não foram expandidas as bancadas de Separação Manual, onde essas foram verificadas como maiores gargalos na produção. Sob uma ótica do desempenho operacional, a linha produtiva trabalharia em sua capacidade máxima com 32 bancadas de Separação Manual e 8 máquinas de Corte Manual, reduzindo seu Lead Time para 9 horas, uma medida que acarretaria em um crescimento nos custos de funcionários, de aquisição de máquinas e expansão física.

5 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho consistia na análise da linha produtiva laboratorial da empresa, detecção de possíveis melhorias e elaboração de um MFV de um *layout* para produção industrial em larga escala. O propósito do estudo foi alcançado através das simulações realizadas e avaliação crítica dos resultados obtidos, promovendo melhorias contínuas nos processos, eliminando desperdícios detectados e aumentando o desempenho operacional da empresa.

Os resultados obtidos pelas simulações contribuem de forma prática e teórica para a empresa, de tal forma que todos os processos foram estudados de forma individual e com o CAST, analisando suas particularidades teóricas e práticas, verificando as capacidades hipotéticas e reais de cada bancada ou maquinário. Essas atividades foram possibilitadas graças às técnicas associadas ao LM, entre elas, Kanban, Kaizen, MFV, além do combate aos desperdícios e princípios fundamentais. De tal forma que, graças ao *software* TecnomatixTM da Siemens e sua riqueza nos detalhes para simulações, foi possível gerar e sugerir diversas otimizações e um *layout* pronto para aplicação industrial.

Entre as dificuldades enfrentadas durante o trabalho, a principal foi o impacto causado pela pandemia devido ao COVID-19, a qual ocasionou muitas dificuldades para escolha da empresa estudada, contato e visitas presenciais. Apesar das adversidades, o contato foi estabelecido principalmente de forma virtual, através de reuniões *online* para fornecimento de dados e detalhes operacionais. O acompanhamento das experiências laboratoriais foi comprometido de forma similar, devido às restrições impostas pelas normas de saúde do Estado de São Paulo e da universidade.

Para pesquisas futuras, a coleta de dados econômicos e energéticos de cada processo seria de grande valor, haja vista a capacidade do *software* de simulação, o qual é capaz de receber o *input* destes parâmetros para um resultado cada vez mais próximo do real e observado na prática, possibilitando outras melhorias e otimizações, escancarando possíveis novos desperdícios mascarados na linha produtiva.

REFERÊNCIAS

- ABINEE. Desempenho setorial - DECON - Abinee. São Paulo, 2021. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm> Acesso em: 22 jun. 2021.
- ANTUNES, J. V. A. **A lógica das perdas no sistema Toyota de produção**: Uma análise crítica. Anais do XIX EANPAD: João Pessoa, 1995. 1 CD rom.
- BALDE, C. P.; WANG, F.; KUEHR, R.; HUISMAN, J. **The global ewaste monitor 2014: quantities, flows and resources**. [Bonn.: United Nations University : IAS- SCYCLE 2015. Disponível em: <https://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf> Acesso em: 23 jun. 2021.
- BARTZ, A. P. B. Aplicação da produção enxuta em uma indústria de produtos agrícolas. **Ingeniare Arica**, v. 21 n. 1, p.147-158, 2013.
- BRIEF CONSULTORIA. **Lean manufacturing**. 2014. Disponível em: <http://www.brief.com.br> Acesso em: 15 jun. 2021.
- CORIAT, B. **A revolução dos robôs**. São Paulo: Busca Vida, 1988.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N. **Just-in-time, MRP II e OPT**: um enfoque estratégico. São Paulo: Atlas, 1993.
- DEON, A. G. **Medição do custo das perdas associadas ao processo produtivo de fabricação de celulose e papel**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- DONADEL, C. M.; LORANDI, J. A. **A logística do comércio eletrônico do B2C (business to consumer)**. 2020. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.org/articles/201202446.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2021.
- DORELLA, G; M, M. B. A study of the separation of cobalt from spent Li-ion battery residues. **Journal of Power Sources**, [S. l.], v. 170, n. 1, p. 210–215, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.025>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775307007446>. Acesso em: 23 jun. 2021.
- ENERGY SOURCE. **Soluções de alta performance com menor custo benefício**. Disponível em: <https://energysource.com.br/EnergyS/>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- FERRO, J. R. **A essência da ferramenta mapeamento do fluxo de valor**. set. 2005. Disponível em: <https://www.lean.org.br/artigos/61/a-essencia-da-ferramenta-mapeamento-do-fluxo-de-valor.aspx> . Acesso em: 15 jun. 2021.
- GHINATO, P. **Sistema Toyota de produção**: mais do que simplesmente just-in-time. Caxias do Sul: Ed. da UCS, 1995.

GROOVER, M. P. **Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing**. 3th ed. New York: Prentice Hall, 2007.

GUTIERREZ, R. M. V; ALEXANDRE, P. V. M. Complexo eletrônico brasileiro e competitividade. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n, 18, p. 165-191, set. 2005.

HINO, S. **O Pensamento Toyota: princípios de gestão para um crescimento duradouro**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HOREH, N. B; MOUSAVI, S. M.; SHOJAOSADATI S. A. Biobleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*. **Journal of Power Sources**, v. 320, p. 257-266, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.104>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775316304773>. Acesso em: 23 jun. 2021.

LIKER, J.; MEIER, D. **O modelo Toyota: manual de aplicação**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

MAGRISE, M. A. **Melhorias de produtividade: um estudo de caso em uma indústria de tintas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Porto Alegre, UFRGS, 2000.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. 2. ed.aum. e atual. São Paulo: Saraiva, 2005.

MODEN, Y. I. **Produção sem estoques: uma abordagem prática ao sistema de produção da Toyota**. São Paulo: IMAM, 1984.

MOREIRA, E. A.; MIGUEL, P. A. C. Relato de um caso dos primeiros passos sobre a aplicação da produção enxuta em processos administrativos. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Porto Alegre-RS, 2005. NUMA.

NOVAS, A. G. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997.

SHINGO, S. **O sistema Toyota de produção**. 2. ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996.

SLACK, N; CHAMBERS, S; JOHSTON, R. **Administração da produção**. 4. Ed. São Paulo Atlas, 2017.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. **Going backwards: reverse logistics trends and practices**. Reno: Universidade de Nevada, 1999.

ROTHER, M; SHOOK, J. **Aprendendo a enxergar: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar desperdícios**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 1998.

SANTOS, M. P. A technology for recycling lithium-ion batteries promoting the circular economy: the recyclib. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v.175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105863>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921004729>. Acesso em: 09 nov. 2021.

TUBINO, D. F. **Sistemas de produção**: a produtividade do chão de fábrica. Porto Alegre: Bookman, 1997.

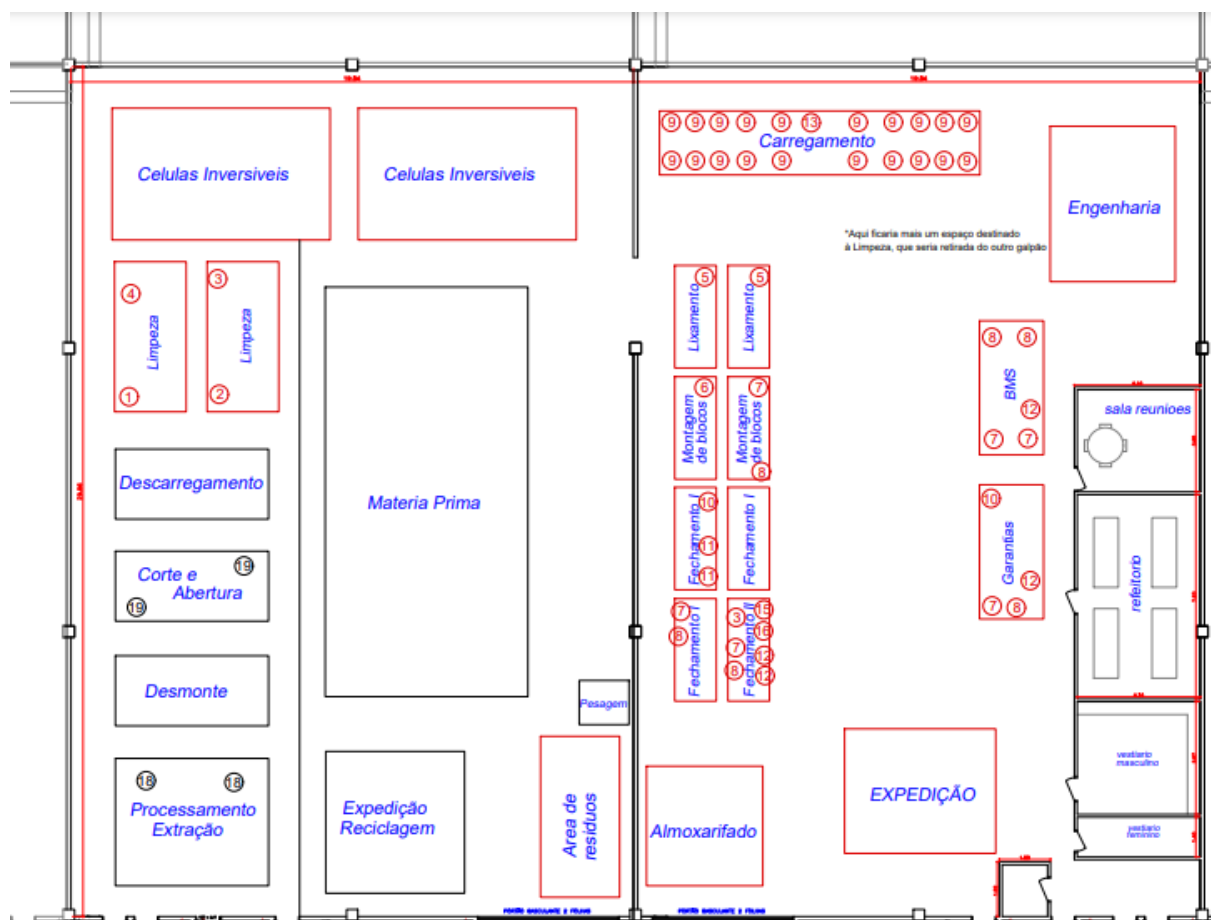
WERKEMA, M. C. C. **Lean seis sigma**: introdução às ferramentas do lean manufacturing. Belo Horizonte: Werkema, 2006.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A mentalidade enxuta nas empresas: elimine o desperdício e crie riqueza**. 5 ed. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROSS, D. **A máquina que mudou o mundo**. 11. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

APÊNDICE A

Figura 15 – Planta baixa ENERGY SOURCE



Fonte: Fornecida pela ENERGY SOURCE (2021).