

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUISA DELATTRE DE JESUS

PROJETO DE FÁBRICA E BALANCEAMENTO DA LINHA DE PRODUÇÃO:
ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE FERTILIZANTES LÍQUIDOS

CURITIBA

2021

LUÍSA DELATTRE DE JESUS

**PROJETO DE FÁBRICA E BALANCEAMENTO DA LINHA DE PRODUÇÃO:
ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE FERTILIZANDES LÍQUIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof(a). Dr(a). Silvana Pereira Detro.

CURITIBA

2021

TERMO DE APROVAÇÃO

LUÍSA DELATTRE DE JESUS

PROJETO DE FÁBRICA E BALANCEAMENTO DA LINHA DE PRODUÇÃO: ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE FERTILIZANDES LÍQUIDOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Prof(a). Dr(a). Silvana Pereira Detro – Orientadora

Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Paraná

Prof(a). Dr(a). Nicolle Christine Sotsek Ramos

Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Paraná

Prof(a). Dr(a). Ruth Margareth Hofmann

Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 17 de dezembro de 2021.

Aos meus pais, irmãs e noivo, por sempre estarem presentes em minha vida oferecendo todo incentivo, apoio, paciência, amor e carinho.

RESUMO

O conjunto de decisões estratégicas e estruturais que envolve o projeto de instalações deve ser extremamente bem planejado, para que se obtenha diferenciais competitivos por meio do equilíbrio entre diversos fatores como qualidade, logística, sustentabilidade, custos, tempo de produção e estoques. Nesse cenário, o objetivo principal deste trabalho é definir o projeto e arranjo físico de uma fábrica por meio da implantação do modelo *FacPlan*, com foco nos níveis de planejamento Macro e Micro, contemplando também o balanceamento do fluxo produtivo por meio de um modelo matemático de otimização que segue o Método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), buscando minimizar o tempo de ciclo da linha. Para isso, primeiramente foi realizado o levantamento e organização das informações estratégicas necessárias, e em sequência foram aplicadas as ferramentas de layout e os métodos de análise. Dois cenários foram considerados e comparados, o primeiro restringindo a capacidade de produção da fábrica e o segundo considerando um possível aumento de demanda no futuro. Os resultados demonstram que o layout considerando futuras expansões é 46,31% mais eficiente que o layout inicialmente proposto, entretanto, por apresentar capacidade produtiva tão superior à demanda, comprova que a empresa ainda se encontra em nível inicial de maturidade e, portanto, em primeiro momento deve utilizar o layout com capacidade produtiva restrita e investir no setor de vendas. Conclui-se então, que a aplicação da metodologia *FacPlan* aliada a modelos de programação matemática são adequados para o planejamento do projeto de fábrica, principalmente por considerar tanto questões estratégicas qualitativas como dados quantitativos, permitindo um maior alinhamento com a realidade e necessidades da empresa.

Palavras-chave: projeto de fábrica, projeto de instalações, arranjo físico, layout, *FacPlan*, capacidade produtiva, balanceamento de linha, modelo de otimização, programação não linear inteira.

ABSTRACT

The set of strategic and structural decisions involving facilities design must be extremely well planned in order to obtain competitive advantages through the balance between several factors such as quality, logistics, sustainability, costs, production time and stocks. In this scenario, the main objective of this paper is to define the design and physical arrangement of a factory through the implementation of the FacPlan model, focusing on the Macro and Micro planning levels, including the production line balancing through a mathematical optimization model that follows the Generalized Reduced Gradient Method (GRG), seeking to minimize the line cycle time. Therefore, first the survey and organization of the required strategic information was performed, and subsequently the layout tools and analysis methods were applied. Two scenarios were considered and compared, the first restricting the factory's production capacity and the second considering a possible increase in demand in the future. The results show the layout considering future expansions is 46.31% more efficient than the initially proposed layout, however, as it presents a productive capacity so much higher than the demand, it proves that the company is still at an initial level of maturity and, therefore, at first, the plant layout with restricted production capacity should be used and investments in the sales sector must increase. In conclusion, the implementation of FacPlan methodology combined with mathematical programming models are suitable for planning industrial designs, mainly for considering both qualitative strategic factors and quantitative data, accomplishing greater alignment with the reality and needs of the company.

Keywords: *factory design, facility design, industrial layout, plant layout, FacPlan, production capacity, line balancing, optimization model, integer non-linear programming.*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO	16
FIGURA 2 – TÉCNICAS DE PREVISÃO DE DEMANDA.....	18
FIGURA 3 – TIPO DE LAYOUT DE ACORDO COM VOLUME E VARIEDADE DO PROCESSO.....	22
FIGURA 4 – LAYOUT FIXO OU POSICIONAL	23
FIGURA 5 – LAYOUT POR PROCESSO OU FUNCIONAL.....	24
FIGURA 6 – LAYOUT POR PRODUTO OU LINEAR.....	25
FIGURA 7 – LAYOUT CELULAR	26
FIGURA 8 – NÍVEIS DO MODELO FACPLAN DE PLANEJAMENTO DE INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS	27
FIGURA 9 – MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES.....	28
FIGURA 10 – PLANEJAMENTO DO NÍVEL MACRO	29
FIGURA 11 – DIAGRAMA DE AFINIDADE	32
FIGURA 12 – MAPOFLUXOGRAMA	33
FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO	42
FIGURA 14 – DIAGRAMA DE NECESSIDADES DO ESPAÇO.....	49
FIGURA 15 – DIAGRAMA DE AFINIDADE	50
FIGURA 16 – DIAGRAMA DE SPAGHETTI.....	51
FIGURA 17 – MAPOFLUXOGRAMA	52

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – PREVISÃO DE PRODUÇÃO PARA O ANO DE 2023 43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DEFINIÇÃO DOS MAQUINÁRIOS	45
TABELA 2 – PADRÃO-MINUTO DE CADA OPERAÇÃO	47
TABELA 3 – RESULTADO DA MODELAGEM E MINIMIZAÇÃO DO TEMPO DE CICLO PARA UMA CAPACIDADE DIÁRIA DE 5000 LITROS.....	54
TABELA 4 – RESULTADO REAL DA MODELAGEM E MINIMIZAÇÃO DO TEMPO DE CICLO PARA UMA CAPACIDADE DIÁRIA DE 5000 LITROS....	54
TABELA 5 – RESULTADO DA MODELAGEM E MINIMIZAÇÃO DO TEMPO DE CICLO SEM RESTRIÇÃO DE CAPACIDADE DIÁRIA	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO.....	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 ESTRUTURA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO.....	16
2.2 PREVISÃO DE DEMANDA	18
2.3 CAPACIDADE DE PRODUÇÃO	19
2.4 ARRANJOS FÍSICOS.....	21
2.4.1 Layout fixo ou posicional	22
2.4.2 Layout por processo ou funcional.....	23
2.4.3 Layout por produto ou linear.....	24
2.4.4 Layout celular	25
2.5 FACPLAN.....	26
2.5.1 Nível Global.....	27
2.5.2 Nível Supra.....	28
2.5.3 Nível Macro	29
2.5.4 Nível Micro	30
2.5.5 Nível Sub-Micro.....	31
2.6 FERRAMENTAS CLÁSSICAS DE LAYOUT	31
2.6.1 Diagrama de afinidades.....	32
2.6.2 Mapofluxograma.....	32
2.6.3 Balanceamento de linha	33
2.7 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO	36
2.7.1 Programação Não Linear Inteira (PNLI)	37
2.7.2 Método dos Gradientes Reduzidos Generalizado (GRG).....	37
3 METODOLOGIA	39
4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO.....	41
4.1 COLETA DE DADOS E ESTRUTURAÇÃO DO PROJETO	41
4.1.1 Características do produto e do processo	41
4.1.2 Previsão de demanda e definição da capacidade produtiva da fábrica.....	43

4.1.3 Maquinários e Níveis de Tecnologia	44
4.1.4 Padrão por minuto das operações	46
4.2 ANÁLISE E ELABORAÇÃO DO PROJETO DE FÁBRICA.....	47
4.2.1 Nível Global.....	48
4.2.2 Nível Supra.....	48
4.2.3 Nível Macro e Micro.....	50
4.2.4 Layout final	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS.....	61
ANEXO 1 – MAPOFLUXOGRAMA	65
ANEXO 2 – PLANTA BAIXA LAYOUT FABRIL	66
ANEXO 3 – PLANTA BAIXA LAYOUT MEZANINO	67
ANEXO 4 – PLANTA BAIXA LAYOUT ADAPTADO PARA EXPANSÕES.....	68

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é um essencial fomentador da economia brasileira, visto que o país é um dos maiores produtores e fornecedores globais de grãos, cana-de-açúcar, carne e produtos florestais. O setor representa uma grande parcela na balança comercial e no PIB do Brasil – alcançando participação de 26,6% e cerca de dois trilhões de reais no ano de 2020, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). Como um grande produtor agrícola, o país é também um grande consumidor de fertilizantes, o que demonstra a tendência de expansão apresentada por esse setor e, conjuntamente, o crescimento do interesse de mercado e o surgimento de novas oportunidades.

Nesse contexto, indústrias químicas e agroindústrias que atuam no mercado de fertilizantes têm o grande desafio de conquistar vantagens competitivas que atendam às diversas exigências dos clientes e que contribuam para que se chegue ao êxito do negócio. Como consequência, é intensificada a necessidade do constante incentivo à utilização de novas técnicas de apoio à gestão, bem como a busca pela maximização da eficiência do processo produtivo. Para tanto, é imprescindível projetar seus sistemas de produção e suas unidades produtivas de acordo com as demandas do mercado e com seus planejamentos estratégicos. Buscando sempre relacionar e equilibrar no projeto de fábrica diversos fatores como qualidade, logística, sustentabilidade, custos, tempo de produção, estoques, entre outros.

Segundo Neumann e Scalice (2015), projeto de instalações ou projeto de fábrica é um conjunto de questões estratégicas e estruturais que devem ser projetadas pelos engenheiros de produção, visando criar diferenciais competitivos de longo prazo para a empresa, com o objetivo de melhor posicionará-la no mercado. Diversas variáveis devem ser consideradas durante a elaboração do projeto de fábrica, bem como a previsão de demanda, sistema produtivo, arranjos físicos e balanceamento da produção.

Segundo Dias (1993), a previsão de demanda é uma estimativa antecipada do volume de vendas em um período determinado, calculada com a utilização de métodos qualitativos, quantitativos ou mistos, considerando uma margem de erro. De acordo com Villar e Nobrega (2014), ela é essencial para o dimensionamento e estruturação de uma instalação fabril, visto que serve como embasamento para a

determinação das quantidades de bens e serviços que devem ser geradas em uma unidade produtora, impactando diretamente também no planejamento produtivo.

Projetar o fluxo de materiais que são envolvidos no processo é parte crucial do projeto de instalações. Para isso, realiza-se o estudo de layout, que corresponde à organização do arranjo físico dos diversos postos de trabalho nos espaços disponíveis, atendendo à preocupação de melhor adaptar as pessoas ao ambiente de trabalho, levando em consideração a natureza da atividade desempenhada e a arrumação dos móveis, máquinas, equipamentos e matérias-primas (CURY, 2007).

De acordo com Boysen, Fliedner e Scholl (2007), a garantia de uma configuração equilibrada de um fluxo produtivo é de crítica importância para a implementação de um sistema produtivo eficiente. Nesse sentido, estudos de balanceamento da linha de produção – que tem como objetivo homogeneizar a distribuição de tarefas entre as estações e operadores – geram benefícios diversos no planejamento de fábrica, bem como a melhoria do fluxo e a minimização dos tempos ociosos, das estações de trabalho necessárias e dos níveis de estoque (DESSOUKY; ADIGA; PARK, 1995).

Os investimentos demandados na execução de um projeto de fábrica – que envolve diversos processos, tecnologias e arranjos – são substancialmente altos e arriscados, portanto, requerem análises aprofundadas que embasem a tomada de decisão. Buscando a minimização desses riscos, é crucial o cálculo correto das necessidades de recursos de cada operação para embasar uma tomada de decisão que corrobore para um melhor nível de produtividade e para evitar investimentos desnecessários. Para isso, uma boa alternativa é a aplicação de modelos de otimização, visto que, dadas as circunstâncias, são capazes de fornecer uma solução exata para os problemas – minimizando os custos ou maximizando os benefícios de modo que o melhor resultado possível seja alcançado (RAO, 2009).

O presente trabalho apresenta a realização de um projeto de fábrica de fertilizantes, contemplando essencialmente os seguintes conteúdos: a aplicação do modelo de implantação de fábrica *FacPlan* proposto pelo autor Quarterman Lee (1998); implementação de um modelo de otimização para o balanceamento do fluxo produtivo buscando a minimização do tempo de ciclo; apresentação da planta com o resultado do layout final.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é definir o projeto e arranjo físico de uma nova fábrica de fertilizantes que permita futuras expansões, por meio da aplicação do modelo *FacPlan* de implantação de fábricas, com foco nos níveis de planejamento Macro e Micro.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- (1) planejar os níveis global, supra, macro e micro da implementação de uma fábrica de fertilizantes líquidos;
- (2) balancear o fluxo produtivo minimizando o tempo de ciclo da linha e respeitando as restrições do sistema por meio de um modelo de otimização;
- (3) apontar recomendações e melhorias para direcionar futuras expansões da fábrica;
- (4) analisar a eficiência da linha e a capacidade produtiva total.

1.2 ESTRUTURA

O trabalho está dividido em 5 capítulos, apêndice e anexos. Inicialmente uma introdução é apresentada, fornecendo uma abordagem geral, justificativas e a definição dos objetivos específicos do estudo. Na sequência, o trabalho retrata uma revisão bibliográfica dos tópicos mais relevantes para contextualização e entendimento do estudo, englobando sistemas de produção, previsão de demanda, capacidade produtiva, arranjos físicos, metodologia *FacPlan*, algumas ferramentas clássicas de layout, e modelos de otimização de problemas. O capítulo 3 demonstra em detalhes a metodologia de estudo de caso, apresentando os materiais e métodos do estudo e estruturando todas as etapas a serem executadas. O capítulo 4 contempla o desenvolvimento do trabalho, ou seja, a execução das etapas listadas no capítulo

precedente. E por fim, o último capítulo apresenta a conclusão do trabalho, sintetizando os resultados e comentários da aplicação do estudo de caso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

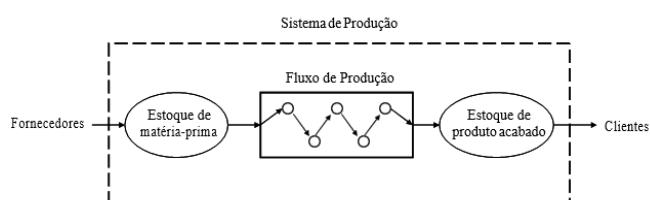
A Revolução Industrial foi o período de grande desenvolvimento tecnológico que teve início na Inglaterra a partir da segunda metade do século XVIII. A grande marca do período foi o surgimento da atividade industrial e das primeiras fábricas. Com o passar do tempo, foi se tornando cada vez mais evidente pelos proprietários, a necessidade de aprimorar as estratégias de sistemas de produção, bem como os projetos de instalações industriais e a organização interna das fábricas, que vem sendo amplamente estudado desde então (MUTHER; WHEELER, 2000).

O Planejamento das Instalações de uma determinada unidade produtiva, em síntese, compreende a resolução das seguintes questões: o quê, quanto, onde e como produzir. Sendo assim, faz-se necessário o estudo de diversos aspectos, como necessidades de capital; projeto do produto; definição do sistema de produção; estudo do mercado; previsão de vendas; escolha da faixa de concorrência; definição da capacidade produtiva mínima; e escolha dos processos produtivos; para então definir a localização da instalação, estrutura, arranjo físico e desenvolvimento da organização (VILLAR e NOBREGA, 2014). Portanto, previamente ao desenvolvimento do layout fabril, é primordial que se tenha tais informações bem definidas no plano estratégico e plano de negócio.

2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Sipper e Bulfin (1997) classificam sistemas de produção como “tudo aquilo que transforma *input* em *output* com valor inerente”, ou seja, o sistema de produção inicia-se com o estoque de matéria-prima (*inputs*) que passam por processos de transformação dentro de um fluxo produtivo até que se transformem em produtos acabados (*outputs*), conforme mostra a Figura 1.

FIGURA 1 – ESQUEMA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO



FONTE: Adaptado de Sipper e Bulfin (1997)

Schroeder, Rungtusanatham e Goldsteing (2013) citam cinco diferentes processos de produção, são eles:

- 1) **Processo por projeto (*project shop*):** produção de um produto único e customizado por vez, portanto é caracterizado por um baixo volume e elevada variabilidade. Esse tipo de processo apresenta início e fim bem definidos e a sequência de atividades possuem pouca ou nenhuma repetitividade.
- 2) **Processo por tarefa (*job shop ou jobbing*):** sistema produtivo intermitente caracterizado pela produção de lotes pequenos com uma grande variedade de produtos, que apresentam vários elementos em comum. Cada produto diferente necessita uma sequência distinta de etapas de processamento, para isso, os equipamentos geralmente são universais e flexíveis. Enquanto os recursos dos processos por projetos são focados exclusivamente para um produto, nos processos de *jobbing* os recursos são compartilhados.
- 3) **Processo em lotes (*batch shop*):** similar ao processo de *job shop*, entretanto, apresenta menor variedade o que viabiliza o aumento dos volumes de produção. Geralmente é utilizado quando a linha de produtos é relativamente estável e com a maioria dos itens seguindo o mesmo padrão de fluxo, sendo cada um produzido em lotes de tamanho médio.
- 4) **Processos em massa (linha de montagem):** a produção de alto volume de produtos com pequena variedade. Esses produtos são transportados pelas estações de trabalho em um ritmo controlado seguindo a sequência lógica das operações.
- 5) **Processos de fluxo contínuo (*flow shop*):** processo extremamente inflexível, com alto volume de produção de produtos padronizados, semelhante à produção em linha, entretanto o fluxo produtivo é contínuo. Normalmente é altamente automatizado, podendo trabalhar até 24 horas por dia para evitar paradas.

A definição do processo e sistema de produção deve estar em alinhamento com a demanda dos produtos, visto que menores ou maiores volumes e variedades podem ser requeridos pelos consumidores. A harmonia entre esses quesitos é crucial para o alcance dos objetivos estratégicos da empresa durante a elaboração do projeto de fábrica.

2.2 PREVISÃO DE DEMANDA

A previsão da demanda futura é a base para as decisões estratégicas e de planejamento em uma cadeia de suprimento, elas auxiliam a gerência a reduzir incertezas viabilizando a construção de planos mais confiáveis e realistas. Segundo Martins e Laugeni (2005), a previsão de vendas é extremamente importante para aumentar a eficiência da organização, proporcionando que todas as operações sejam adequadamente programadas, bem como a utilização adequada das máquinas e a reposição dos materiais no momento e na quantidade ideais. Além disso, de acordo com Villar e Nobrega (2014), a previsão de demanda também é essencial para o dimensionamento de uma unidade fabril, visto que esta deve ser projetada para que sua estrutura e dimensões acomodem a quantidade demandada futura.

FIGURA 2 – TÉCNICAS DE PREVISÃO DE DEMANDA



FONTE: Corrêa e Corrêa (2019)

Como demonstrado na FIGURA 2, os métodos de previsão de demanda podem ser qualitativos, quantitativos ou mistos. Os primeiros são exclusivamente intuitivos, baseiam-se nas impressões e opiniões do setor de vendas, da gerência, dos consumidores e fornecedores, podem ser pesquisas de mercado, analogia com produtos similares, Método Delphi etc. As técnicas quantitativas são fundamentadas em dados concretos, por meio de análises objetivas dos dados passados e projeções de demanda futura realizadas com modelos matemáticos. Os modelos quantitativos

de previsão mais utilizados são: modelo da equação linear para a tendência e o modelo dos mínimos quadrados ou regressão linear (VILLAR E NÓBREGA, 2014).

De acordo com Mantovani (2009), o sucesso de um sistema produtivo depende da sua capacidade de equilibrar demanda e produção; portanto, o cálculo da capacidade produtiva é diretamente de uma previsão de demanda consistente.

2.3 CAPACIDADE DE PRODUÇÃO

De acordo com Slack, Chambers e Johnson (2002), a capacidade de produção é o máximo nível de atividade de valor adicionado que o processo pode realizar sob condições normais de operação em determinado período de tempo. De forma análoga, Moreira (1998) afirma que a capacidade é a quantidade máxima de produtos e serviços que podem ser produzidos em um dado intervalo de tempo por uma unidade produtiva, que pode ser uma fábrica, um departamento, uma loja ou um funcionário.

O conceito de capacidade de produção é diretamente relacionado com as demandas de mercado, portanto, é de extrema importância que esteja alinhado com as estratégias da empresa, suas análises mercadológicas e suas previsões de vendas, buscando garantir o atendimento das demandas atuais e futuras, mas também evitar capacidades em excesso no fluxo produtivo. Nesse sentido, pode-se concluir que a capacidade produtiva representa o volume ideal de produção de produtos, buscando um nível oportuno de atividades que não deixe de suprir a procura – não criando insatisfação nos clientes e nem prejudicando a reputação da organização – mas que também não extrapole, gerando espaços físicos ociosos ou estoques desnecessários. Ou seja, ela deve ser determinada de modo a proporcionar um equilíbrio entre maximização das receitas e minimização dos custos, aumentando os lucros (SLACK, CHAMBERS E JOHNSON, 2009).

Corrêa e Corrêa (2019) indicam algumas medidas de capacidade para a realização de projeções de capacidade, são elas:

- a) Capacidade disponível ou de projeto (CP): é a capacidade na situação perfeita do sistema de produção, ou seja, representa a quantidade máxima que uma unidade produtiva pode produzir durante a jornada de trabalho, sem considerar qualquer tipo de perdas, como manutenções, transportes ou restrições do fluxo. Calculada em função da jornada de trabalho adotada.

- b) Capacidade efetiva ou carga (CE): capacidade disponível considerando as perdas planejadas no sistema, ou seja, as perdas que são previstas, tais como troca de turno, tempo de *set-up*, manutenções preventivas, intervalos etc.

$$CE = CP - \text{Perdas Programadas} \quad (1)$$

- c) Utilização: índice que representa quanto, em percentual, a unidade produtiva está utilizando da sua capacidade disponível.

$$U = \frac{CE}{CP} \quad (2)$$

- d) Capacidade realizada (CR): representa a capacidade que realmente foi realizada no período, portanto considera também as perdas não planejadas no sistema, como falta de recursos, manutenções corretivas, considerando também o fluxo fabril e o tamanho do lote.

$$CR = CE - \text{Perdas não programadas} \quad (3)$$

- e) Eficiência (E): índice que representa o percentual de eficiência da unidade produtora em termos de capacidade realizada. É calculada pela razão entre capacidade realizada e capacidade efetiva.

$$E = \frac{CR}{CE} \quad (4)$$

- f) Capacidade operacional ou de planejamento (CO): é a capacidade em que os gestores e projetistas devem se embasar para a realização do seu planejamento, pois reduz a capacidade teórica total aos níveis de utilização e eficiência.

$$CO = CP \times E \times U \quad (5)$$

Segundo Slack, Chambers e Johnston (2002), estabelecer o dimensionamento da capacidade tem o intuito estratégico de manter a produção e a demanda alinhadas, suprindo as necessidades do mercado enquanto se reduz os níveis de estoques. Portanto, os cálculos da capacidade de produção permitem que os limites de uma unidade produtiva sejam conhecidos e, consequentemente, são uma boa medida para avaliar o desempenho que o arranjo físico da fábrica permite para o processo de produção.

2.4 ARRANJOS FÍSICOS

O conceito de arranjo físico vem sendo adaptado e aprimorado de acordo com as necessidades de cada época. Nos primeiros entendimentos, o assunto é discutido em aplicações isoladas que não continham métodos sistemáticos, até que as abordagens foram sendo desenvolvidas com rumo às fundamentações teórico-sistemáticas e definições mais abrangentes, ampliando seu campo de aplicação. Nesse contexto, o estudo do arranjo físico passou a poder estar presente em qualquer atividade humana e em qualquer processo produtivo, ou seja, não apenas na indústria, mas também na construção de uma ferrovia, de um escritório, de uma residência etc (VILLAR e NOBREGA, 2014).

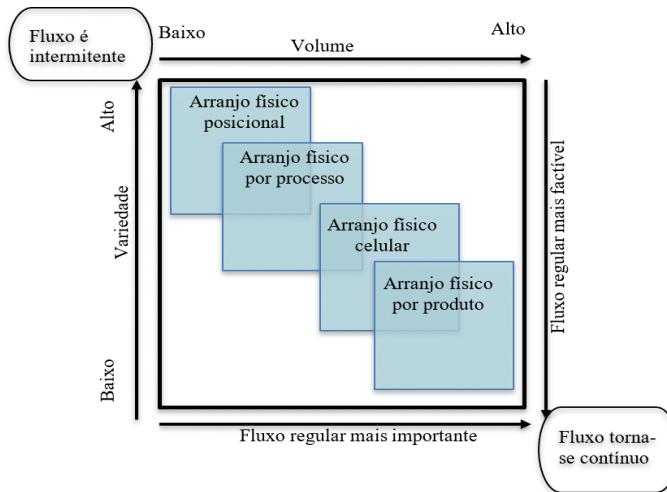
Mais à frente, programas computacionais para a solução de problemas específicos de arranjo físico foram lançados no mercado, marcando um progresso nas soluções de estudos de layout. Com foco nos benefícios e potencial desse tema, Olivério (1985) define Arranjo Físico como um estudo sistemático que busca por uma combinação ótima das instalações industriais, que concorrem para melhorar a produção, dentro de um espaço disponível. Por fim, outra definição descritiva e específica é a de Slack, Chambers e Johnson (2002), que define arranjo físico ou layout como o estudo do posicionamento relativo dos recursos produtivos, homens, máquinas e materiais, ou seja, é a combinação dos diversos equipamentos/máquinas, áreas ou atividades funcionais dispostas adequadamente.

De acordo com Corrêa e Corrêa (2019), os principais objetivos de um bom layout são: minimizar os custos de manuseio e movimentação interna de materiais; utilizar o espaço físico disponível de forma eficiente; apoiar o uso eficiente da mão de obra, evitando movimentações desnecessárias; facilitar comunicação entre as pessoas envolvidas na operação; reduzir tempos de ciclo dentro da operação; facilitar

os fluxos de pessoas e de materiais; incorporar medidas de qualidade e segurança; facilitar manutenção dos recursos; encorajar determinados fluxos, ou seja, induzir clientes ou funcionários a passarem por determinado local – útil para medidas de segurança ou estratégias de vendas; auxiliar na criação de determinadas percepções nos clientes e atender aos requisitos estéticos. O foco desses objetivos varia de acordo com as estratégias de cada organização, sendo necessário alinhar esses objetivos com os seus planejamentos.

Segundo Slack, Chambers e Johnson (2002), a maioria dos arranjos físicos, na prática, deriva de apenas quatro tipos básicos de layout (linear, celular, funcional e fixo) dependendo das características – como níveis de volume e variedade de produtos – do sistema de produção adotado. Aumentando o volume, aumenta a importância de regularizar e linearizar os fluxos, e reduzindo a variedade, aumenta a viabilidade de um arranjo físico baseado num fluxo regular, entretanto, conforme o volume diminui e a variedade aumenta, há uma tendência ao fluxo intermitente.

FIGURA 3 – TIPO DE LAYOUT DE ACORDO COM VOLUME E VARIEDADE DO PROCESSO



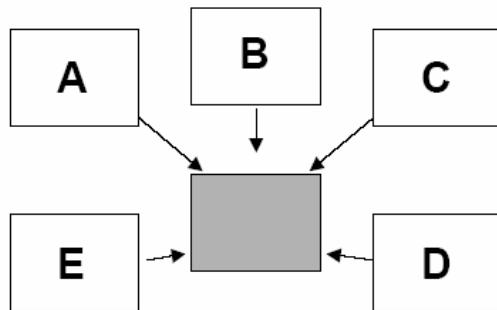
FONTE: Slack, Chambers e Johnson (2009)

2.4.1 Layout fixo ou posicional

O layout fixo ou posicional é aquele em que o produto, ou seja, o material a ser transformado, permanece fixo em uma determinada posição enquanto os recursos de transformação – como maquinário, materiais e pessoas – se deslocam ao seu redor, executando as operações necessárias. Normalmente, layouts posicionais são utilizados em sistemas de produção por projetos e quando a natureza do produto, como peso, dimensões ou forma, impede outra maneira de trabalho, tornando-os de

difícil ou inviável locomoção. Exemplos de aplicações desse tipo de layout são a construção de estradas, canteiros de obras, aviões, atividades agropecuárias, cirurgias etc. O layout fixo é caracterizado por produção em pequena escala e com baixo grau de padronização (SLACK, CHAMBERS E JOHNSON, 2002). A FIGURA 4 demonstra um diagrama do arranjo fixo.

FIGURA 4 – LAYOUT FIXO OU POSICIONAL



FONTE: Adaptado de Silveira (1998)

A região cinza retrata o produto e as letras A, B, C, D e E representam os maquinários, recursos humanos, materiais, peças, matérias-primas e todos os recursos de transformação.

2.4.2 Layout por processo ou funcional

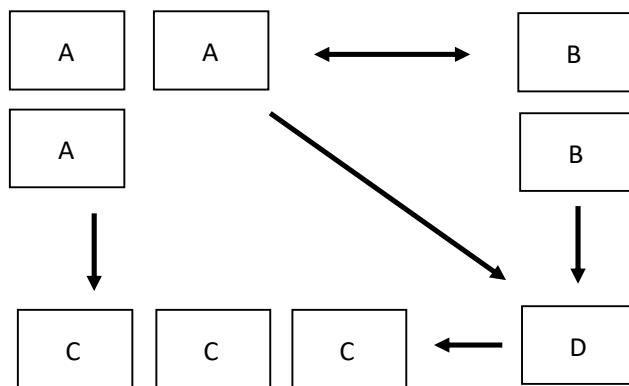
O layout por processo ou funcional é aquele em que todos os processos e equipamentos de mesma categoria e função são colocados juntos, constituindo um arranjo típico de especialização por processo – onde as máquinas que realizam operações iguais ou semelhantes ficam agrupadas e as peças são movimentadas em lotes de um setor para outro (BLACK, 1998).

É um tipo de layout flexível, que tem como vantagem a capacidade de produzir uma grande diversidade de produtos em diversas quantidades, o que torna seu fluxo longo dentro da fábrica. É mais aplicável para os sistemas de produção intermitentes, principalmente os processos de *jobbing*, quando o volume de produção não é muito alto e existe uma grande diversificação de tipos de produtos ou serviços. (NEUMANN E SCALICE, 2015).

Algumas organizações que ajustam seu layout desta forma são os hospitais, lojas comerciais, fábricas de confecções, entre outras. A metodologia mais utilizada

na literatura para auxiliar no gerenciamento deste tipo de arranjo físico é a SLP – *Systematic Layout Planning*.

FIGURA 5 – LAYOUT POR PROCESSO OU FUNCIONAL



FONTE: Adaptado de Silveira (1998)

A FIGURA 5 demonstra o agrupamento dos blocos com a mesma letra, representando os postos de trabalho similares ao longo do processo produtivo. As setas indicam o fluxo do produto que se movimenta entre os postos de trabalho.

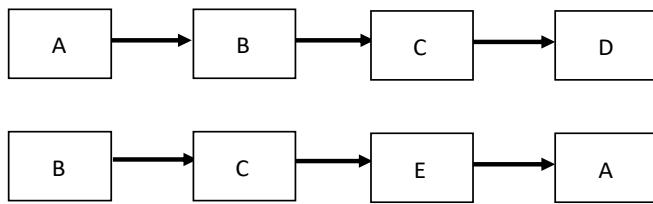
2.4.3 Layout por produto ou linear

No layout por produto ou linear, o produto se movimenta pelos postos de trabalho, máquinas e equipamentos, que são alocados na sequência lógica da execução das operações, tendo, assim, apenas uma única entrada e uma única saída.

Esse tipo de arranjo físico não é flexível, entretanto, tem a vantagem de ter um fluxo muito rápido na fabricação de produtos padronizados, pois a configuração das estações de trabalho é projetada para minimizar os tempos ociosos ao longo da linha de produção. Portanto, é recomendado para sistemas de produção contínua ou em massa, que são caracterizados pela baixa variedade e alto volume de produtos (CORRÊA; CORRÊA, 2019).

Linhas de montagem de veículos, aparelhos eletrônicos e fábricas de papel e celulose são exemplos de organizações que possuem este tipo de configuração. A técnica mais aplicada para gerenciamento deste tipo de layout é o balanceamento de linha, buscando minimizar os efeitos negativos do gargalo.

FIGURA 6 – LAYOUT POR PRODUTO OU LINEAR



FONTE: Adaptado de Silveira (1998)

2.4.4 Layout celular

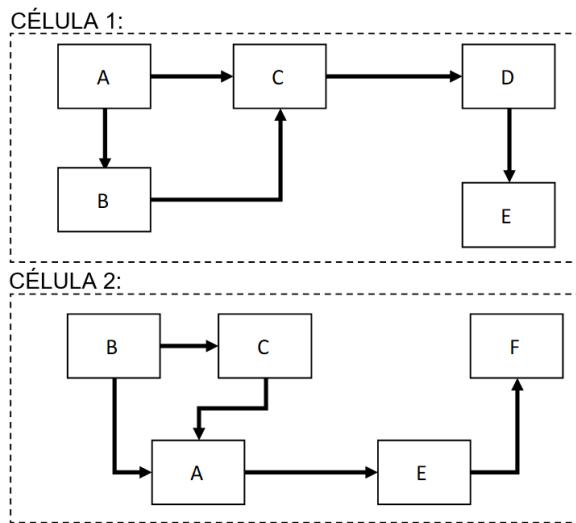
O layout celular surgiu da união do layout linear e do layout funcional, é dividindo em setores especializados, que são organizados de acordo com uma sequência lógica de produção, geralmente formando um “U”. Esses setores são chamados de células, que são unidades pequenas e autônomas com agrupamento de várias máquinas e operações dedicadas à uma família de produtos com características e roteiros de produção semelhantes, ou seja, que necessitem das operações das mesmas máquinas na mesma sequência de processamento. Um dos principais objetivos da célula é confinar os fluxos a uma área específica, reduzindo assim os efeitos negativos e desperdícios com movimentações desnecessárias (LEE, 1996).

Segundo Black (1998), nas células de manufatura os produtos gastam menos tempo para atravessar os processos – diminuindo o *lead time*, visto que as peças são menos manuseadas, o tempo de regulagem das máquinas e o estoque em processo são menores e a mão de obra do trabalhador é mais bem utilizada.

A técnica empregada para a organização deste layout é a Tecnologia de Grupo (TG). O objetivo desde tipo de arranjo é produzir diferentes famílias de produtos, portanto, a variedade dos produtos depende da quantidade de células disponíveis: quanto menos células, menos variedade, visto que elas são centralizadas e posicionadas para produzir apenas uma família específica. Entretanto, uma grande característica do arranjo físico celular é a grande flexibilidade em relação ao volume e tamanho de lotes por produto, oportunizando que as células sejam capazes de atender altas demandas. Nesse contexto, pode-se concluir que esse tipo de arranjo físico pode se adequar para sistemas intermitentes de produção em lotes e para a

produção em massa quando existem diferentes famílias de produtos (SLACK, CHAMBERS E JOHNSON, 2002).

FIGURA 7 – LAYOUT CELULAR



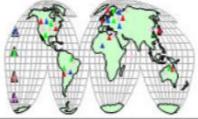
FONTE: Adaptado de Silveira (1998)

2.5 FACPLAN

Segundo Lee (1998), existem diferentes abordagens para a construção de uma instalação, entretanto, o *FacPlan* é a mais recomendada, visto que, além de possuir estrutura bem definida e aplicação sistemática, também reúne a análise estratégica como embasamento para as tomadas de decisões. Além disso, é uma metodologia flexível que utiliza de recursos visuais como gráficos, formulários, fluxogramas para auxiliar na organização das informações, podendo incorporar diversas ferramentas presentes em outras abordagens.

O *FacPlan* é um planejamento de layout realizado de forma ordenada, com divisões por etapas com responsáveis e prazos de execução, seguindo cinco níveis de planejamento que vão desde a localização do terreno da empresa globalmente até a organização da estação de trabalho do operador, são eles: Global, Supra, Macro, Micro e Sub-micro (TURATTO, 2008). É importante destacar que, apesar de ser estruturado em níveis sequenciais, em muitas situações é indicado que algumas etapas do *FacPlan* sejam analisadas e executadas simultaneamente, pois são interdependentes.

FIGURA 8 – NÍVEIS DO MODELO FACPLAN DE PLANEJAMENTO DE INSTALAÇÕES INDUSTRIAS

Nível	Atividade	UPE Típica	Ambiente	Resultado
I Global	Localização e seleção	Locais	Mundo ou País	
II Supra	Planejamento	Características de construções ou local	Local	
III Macro	Layout da construção	Células ou departamentos	Edificação	
IV Micro	Layout de departamento	Características de células ou estações de trabalho	Células ou estações de trabalho	
V Sub-micro	Projeto de estações de trabalho	Localização de ferramentas	Estação de trabalho	

FONTE: Adaptado de Lee (1998)

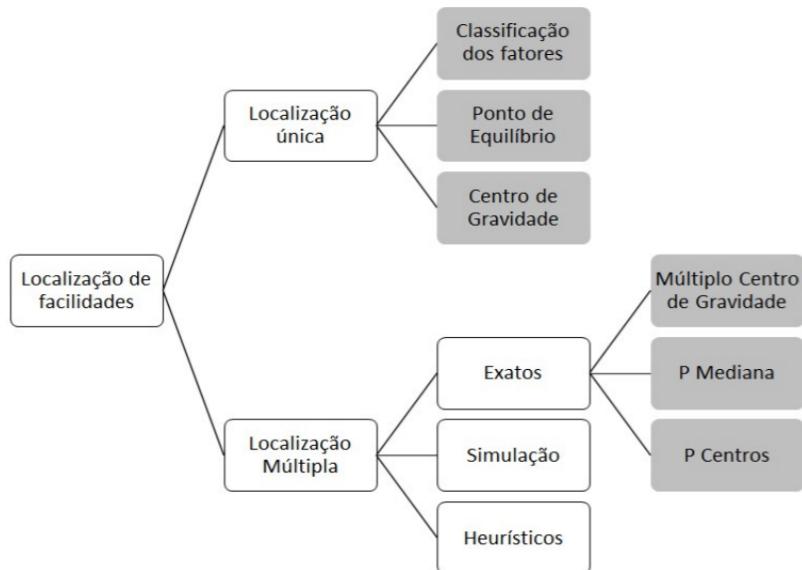
2.5.1 Nível Global

O nível global é o nível mais amplo do planejamento, neste primeiro nível deve ser decidido onde localizar a instalação em um nível global, ou seja, em qual continente, país, estado, cidade etc (LUZZI, 2004). Portanto, deve ser considerado a estabilidade da economia local e das autoridades governamentais, disponibilidades e custos de mão-de-obra, cotas de exportação e importação, taxas de câmbio da moeda, sistemas de transporte e comunicação, oferta de energia, clima, incentivos e restrições governamentais e peculiaridades culturais e econômicas são fatores que afetam as decisões quanto à localização (GAITHER; FRAZIER, 2005).

Existem diversos métodos para a definição da melhor localização fabril, podendo ser (1) de instalação única, ou seja, métodos que sugerem a localização de um ponto de instalação de facilidade; ou (2) de instalações múltiplas, ou seja, métodos que sugerem as localizações de diversos pontos de instalação de facilidades, esses podem ser exatos, simulados ou heurísticos (BALLOU, 2006). Cada método, seguindo seus respectivos fundamentos e estruturas, busca aplicar as

variáveis citadas no parágrafo acima para embasar a tomada de decisão por meio de cálculos matemáticos.

FIGURA 9 – MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES



FONTE: Rodolfo Lisita Pinto (2015)

2.5.2 Nível Supra

Segundo Lee (1998), o nível supra trata do planejamento do tipo de estrutura arquitetônica que será estabelecida, bem como número de edificações; necessidade de espaço por setor; número de funcionários; volume de expedição; volume e mix de produção; utilidades; estrutura organizacional; acesso de tráfego; limitações de projeto; e considerações de possíveis expansões. Além disso, também faz referência às decisões de localização relacionadas ao seu entorno, que darão suporte ao processo produtivo, bem como: armazéns, refeitórios, estacionamento, estradas e ferrovias, estações de tratamento de água, tubulações de gases, entre outros. Devem ser consideradas ainda, o tipo da construção e o material que será utilizado na estrutura, na cobertura, nas fundações e pisos, nos fechamentos laterais e de divisórias.

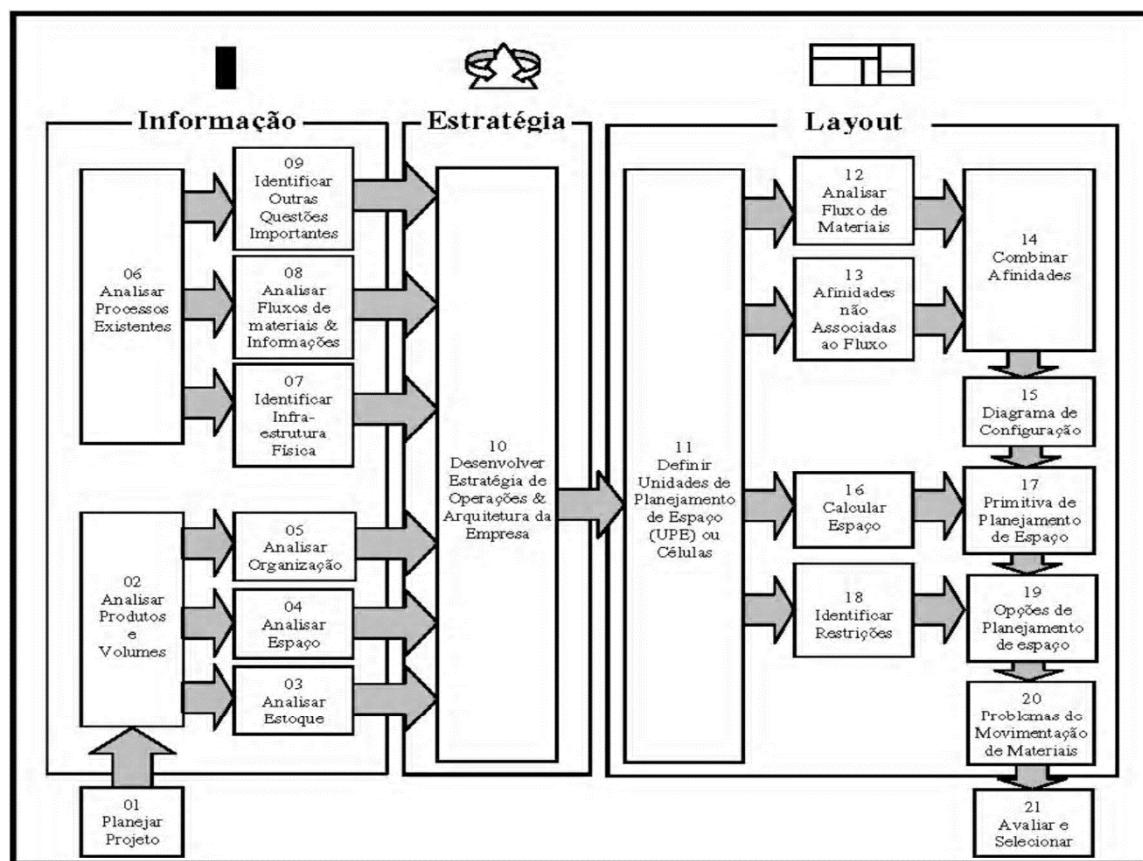
Essas decisões vão impactar diretamente na qualidade, nos custos e na flexibilidade do projeto e, portanto, devem estar bem alinhadas com as estratégias da empresa.

2.5.3 Nível Macro

No nível macro acontece a definição das chamadas Unidades de Planejamento de Espaços (UPEs), que são os departamentos, setores ou subunidades da instalação, desenhando o layout geral da organização. Geralmente, esse é o nível mais importante de planejamento, visto que estabelece o foco da organização interna da fábrica, criando o fluxo global de recursos com efeito a longo prazo - um dos pontos de estudo mais relevantes para o projeto de fábrica. Uma macrolocalização mal planejada poderá resultar em aumento dos custos de manuseio, movimentação, e inflexibilidade, causando dificuldades no lançamento de novos produtos, entregas irregulares e excesso de estoques entre processos (HEPFNER, 2008).

De acordo com Lee (1998), o planejamento do nível macro é dividido em 21 etapas, organizadas em três blocos: (1) informação; (2) estratégia; (3) layout.

FIGURA 10 – PLANEJAMENTO DO NÍVEL MACRO



FONTE: Lee (1998)

A coleta de informações tem como objetivo proporcionar o embasamento para análises referentes ao fluxo de materiais, à organização dos processos e às operações. Para isso, podem ser realizadas entrevistas e questionários com a equipe, com visitas técnicas, com simulações de dados e com análises de documentos, buscando informações qualitativas e quantitativas sobre os produtos e serviços (volume, produtividade, qualidade), a equipe (quantidade, qualificação, turnos de trabalho), ao processo (maquinários, tecnologias), espaços disponíveis, fornecedores, entre outras (LEE, 1998).

As etapas do segundo bloco relacionam as informações coletadas com a estratégia operacional da empresa, garantindo que estejam alinhadas com o projeto de produto e com o sistema de produção. Para isso, é necessário determinar os objetivos de desempenho que serão foco para execução do projeto, os principais apontados por Slack e Lewis (2003) são: qualidade, rapidez, confiabilidade, flexibilidade e custo. Dessa forma, elas determinam como serão gerenciadas as atividades do projeto de fábrica até que se chegue ao objetivo final, garantindo um ambiente fabril que atenda esta estratégia.

Por fim, o último bloco trata da elaboração propriamente dita do layout fabril, ou seja, estabelecer a organização dos espaços, do fluxo de materiais e da movimentação dos recursos e das atividades entre as UPEs. Para isso, diversas ferramentas, que serão detalhadas no item 2.2.6, podem ser utilizadas de acordo com as estratégias dos responsáveis.

2.5.4 Nível Micro

O nível micro representa a organização dos equipamentos e mobiliário dentro de cada UPE estabelecida no nível macro. De acordo com Neumann (2008), neste nível se determina a localização das máquinas, móveis e postos de trabalho para cada UPE do macro espaço, analisando a relação entre os equipamentos e os espaços necessários para a realização de cada atividade do processo, buscando, assim, otimizar a utilização de cada setor. Segundo Luzzi (2004), a ênfase do projeto muda do fluxo bruto de materiais para o espaço pessoal, comunicação e fluxo interno.

No planejamento do micro espaço é primordial que se considere o tipo de arranjo adequado para o processo produtivo presente na UPE (vide item 2.1.4). Esse modelo de arranjo será a base que define a estrutura de alocação dos equipamentos e materiais até que se chegue ao layout final. Assim como no desenvolvimento do macro espaço, ferramentas clássicas de layout podem auxiliar os gestores na condução da implantação do nível micro (vide item 2.2.6).

2.5.5 Nível Sub-Micro

O último nível do projeto de layout, o sub-micro, aborda a análise dos postos de trabalho. De acordo com a definição de Iida (1990), o posto de trabalho é a menor unidade produtiva, que geralmente envolve um homem e seu local de trabalho. Portanto, o planejamento do espaço sub-micro tem foco no posicionamento de ferramentas e dispositivos, englobando o estudo de tempos e movimentos, as condições ergonômicas e as questões relacionadas à segurança do trabalhador – sendo assim crucial considerar os aspectos antropométricos dos trabalhadores e as Normas Regulamentadoras.

2.6 FERRAMENTAS CLÁSSICAS DE LAYOUT

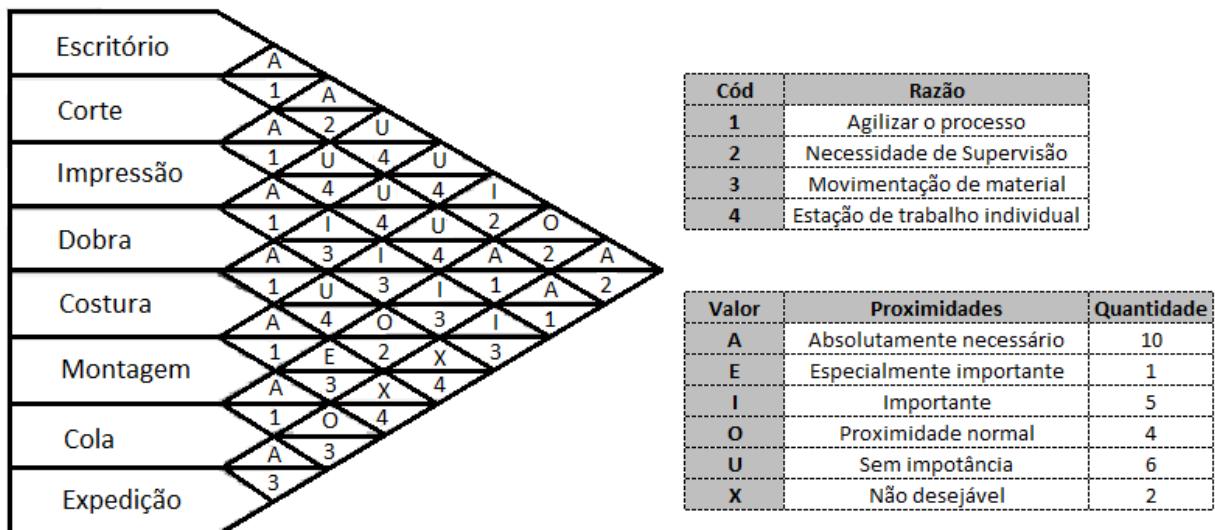
A elaboração das etapas do projeto macro e micro pode contar com o auxílio de diversas ferramentas clássicas de layout, para assim conquistar um arranjo físico adequado que cumpra com os objetivos estabelecidos, como a redução de demoras, economia de espaços, diminuição do *lead time* e aumento de produtividade. Cada tipo de layout permite a utilização de ferramentas diferentes para auxiliar a elaboração do projeto, dependendo do tipo de layout pretendido, quantidade de informações disponíveis ou, até mesmo, preferência do projetista (NEUMANN E SCALICE, 2015).

As ferramentas que serão abordadas nesta pesquisa são: (1) diagrama afinidade; (2) mapofluxograma; e (3) balanceamento de linha.

2.6.1 Diagrama de afinidades

Diagrama de afinidade identifica qual a relação de importância de proximidade entre as atividades, bem como registra suas razões e grau de relacionamento. O objetivo da ferramenta é auxiliar o processo de tomada de posicionamento das estações de trabalho, procurando aproximar as atividades com alto grau de interação e afastar operações que tenham relações negativas, seja por questões de segurança e ergonomia ou por limitações do próprio processo.

FIGURA 11 – DIAGRAMA DE AFINIDADE



FONTE: Slack, Chambers e Johnson (2007)

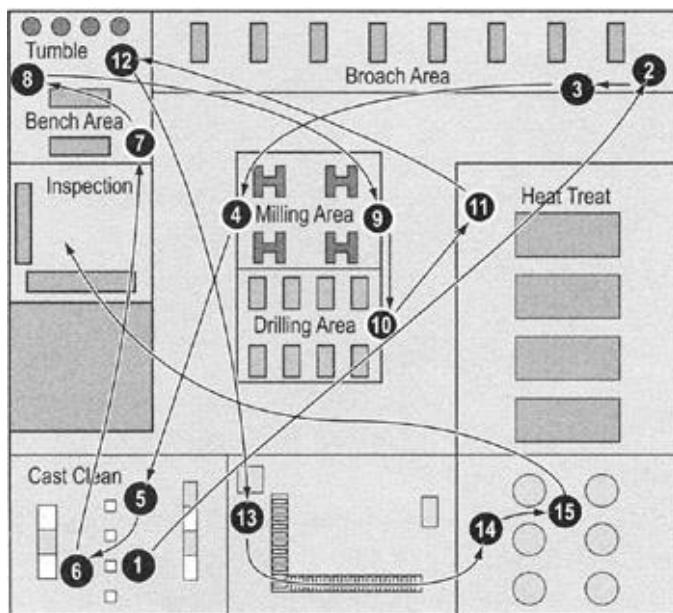
Com o diagrama de afinidades construído, é possível transformá-lo em um diagrama de inter-relações, transferindo-o para dentro de uma representação gráfica de desenho do layout.

2.6.2 Mapofluxograma

O mapofluxograma, também denominado de diagrama de *spaghetti*, representa a movimentação física dos itens dentro do layout de uma instalação produtiva. É obtido desenhando sobre a planta da organização o caminho percorrido pelos produtos a partir das informações que constam nos diagramas de processos,

com o objetivo de reduzir cruzamentos de fluxos e movimentações desnecessárias (NEUMANN E SCALICE, 2015).

FIGURA 12 – MAPOFLUXOGRAMA



FONTE: FM2S Educação e Consultoria (2016).

2.6.3 Balanceamento de linha

O balanceamento de linha é o nivelamento da carga de trabalho ao longo do fluxo de produção, com o objetivo de empregar eficientemente os recursos produtivos disponíveis, removendo gargalos e excessos de capacidade (KUMAR, 2013).

O grande desafio do balanceamento de uma linha de fabricação e montagem é alocar as tarefas em uma determinada sequência de estações, de modo que as relações de precedência sejam satisfeitas e o processo seja equilibrado, dimensionando, assim a capacidade de produção ótima, que permite o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis (BECKER; SCHOLL, 2006).

As principais variáveis de análise do balanceamento são: tempo de ciclo da linha, que representa a frequência com que um produto deve sair da linha; e a existência de precedência entre as tarefas, que é o fator que condiciona o início da execução de cada uma delas (SILVA JÚNIOR et al., 2010).

Os procedimentos para resolução dos problemas de balanceamento podem ser classificados de duas formas: (1) métodos exatos, que normalmente são formulações

de programação matemática que garantem uma solução única e ótima; (2) métodos heurísticos, que oferecem uma solução aproximada da ideal e são recomendados para a resolução de problemas mais complexos quando não é possível encontrar a solução ótima (JOHNSON; MONTGOMERY, 1974). Scholl e Becker (2006) denominam os métodos exatos como Problemas de Balanceamento de Linha de Montagem Simples (*Simple Assembly Line Balance Problems* – SALBP) e os heurísticos como Problemas de Balanceamento de Linha de Montagem Generalizado (*General Assembly Line Balance Problems* – GALBP).

Segundo Neumann e Scalice (2015), o balanceamento simples de uma linha constituída por diversas operações consiste em encontrar a solução para uma das duas seguintes alternativas: (1) Dado um tempo de ciclo, encontrar o menor número de postos de trabalho necessários; (2) Dado um certo número de postos de trabalho, minimizar o tempo de ciclo.

O tempo de ciclo (TC) pode ser obtido numericamente por meio da divisão do tempo disponível de trabalho (horas/dia) pela taxa de produção (demanda) diária:

$$TC = \frac{(Tempo\ disponível\ no\ período)}{(Quantidade\ de\ produção\ exigida\ no\ período)} \quad (6)$$

Segundo Hax e Candea (1984), o desequilíbrio (d) de uma linha de fabricação e montagem pode ser representado pela soma dos tempos ociosos associados à cada estação de trabalho, que é matematicamente expresso pela fórmula a seguir:

$$d = N \times TC - \sum ti \quad (7)$$

d: desequilíbrio da linha

N: número de estações

TC: tempo de ciclo

ti: tempo de cada operação

Cada estação, ou posto de trabalho, é ocupada por um único operador, que pode realizar uma ou mais operações, o número mínimo de operadores ou estações (Nmin) pode ser obtido numericamente por:

$N_{min} = \frac{\sum ti}{TC}$ onde $\sum ti$ é o tempo total necessário para a produção de uma unidade ou ainda a soma das durações de todas as operações. (8)

A capacidade máxima de produção na linha pode ser encontrada com divisão do tempo de trabalho disponível no período pelo tempo de ciclo, sendo assim:

$$\text{Capacidade máxima} = \frac{\text{Tempo disponível no período}}{TC} \quad (9)$$

Problemas simples são caracterizados por terem todos os parâmetros de produção conhecidos e não considerarem restrições além da precedência de atividades. Nesses casos, a busca pela a maximização da eficiência é estipulada pela eficiência do balanceamento (EF), que é matematicamente representada pela razão entre número mínimo de estações (N_{min}) e número real de estações (N_r).

$$EF = \frac{N_{min}}{N_r} \quad \text{onde } N_r \text{ é o número real de operadores em linha} \quad (10)$$

No caso de procedimentos de solução heurística, existem diversos métodos apontados pela literatura, entre eles se destacam os seguintes:

(1) Técnica do Peso Posicional, que consiste em atribuir um peso a cada tarefa – que é igual ao tempo acumulado de processamento da tarefa com suas subsequentes – com o objetivo de minimizar o tempo ocioso total, minimizando o número de estações de trabalho (FERNANDES; GODINHO, 2010);

(2) O Método Heurístico de Kilbridge e Webster (1961), em que se aloca primeiramente as tarefas com o menor número de predecessores até que se tenha a sequência final, em casos de empates, dá-se prioridade a tarefa de maior duração (FERNANDES; GODINHO, 2010).

(3) COMSOAL (*Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines*), que tem como característica básica a geração aleatória de uma sequência possível, o que permite que as sequências encontradas sejam comparadas para que se encontre a que apresenta o menor número de estações (SILVA JUNIOR, 2007).

2.7 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

A tomada de decisão geralmente é definida com base na subjetividade, experiência ou até mesmo na intuição do gestor. Entretanto, uma forma mais assertiva para garantir decisões mais eficazes é a construção de modelos matemáticos de otimização, realizando uma análise quantitativa que gere soluções metrificáveis para o problema. De acordo com Lachtermacher (2009), são diversas as vantagens de utilizar um processo de modelagem para a tomada de decisão, bem como a necessidade de explicitar os objetivos, a identificação e o armazenamento de diferentes variáveis que impactam os resultados e a identificação das limitações do sistema. Em contrapartida, segundo Rothlauf (2011), como os modelos matemáticos descrevem a realidade extraindo as relações mais relevantes de um problema, sempre haverá aspectos da realidade que serão negligenciados ou idealizados para viabilizar a sua resolução.

Colin (2011) define alguns conceitos importantes para a formulação e resolução de problemas de otimização:

- (a) Modelo: representação simplificada de comportamentos reais expressa na forma de equações matemáticas com o objetivo de simular a realidade;
- (b) Função-objetivo: função matemática que representa o principal objetivo do tomador de decisão, podendo ser uma maximização ou minimização;
- (c) Variáveis de decisão: incógnitas do problema que podem ser controladas pelo tomador de decisão, sua variação é o que altera o valor da solução até que se chegue no resultado ótimo;
- (d) Restrições: regras que indicam quais são as limitações dos recursos ou das atividades que estão associados ao modelo;
- (e) Parâmetros: variáveis utilizadas no modelo que não podem ser controladas pelo tomador de decisão, seus valores são fixos para viabilizar a solução do problema;
- (f) Algoritmo: sequência de regras ou instruções que levam à solução de um problema em um número finito de etapas.

A formulação do método de otimização pode ser descrita nas seguintes etapas: (1) descrição do problema; (2) coleta de dados; (3) identificar variáveis de decisão; (4) definir o critério de otimização, ou seja, a função objetivo; e por fim, (5) estabelecer as restrições. Após o seu desenvolvimento, a solução deve ser descrita no relatório de

resultados para que seja feita uma análise mais criteriosa quanto aos resultados (ARORA, 2017).

Rao (2009) aponta que a formulação matemática do problema pode ser programada de diversas maneiras, bem como por meio da Programação Linear; Programação Não Linear; Programação Geométrica; Programação Quadrática; Programação Inteira; e Programação Estocástica (Probabilística).

2.7.1 Programação Não Linear Inteira (PNLI)

Problemas de Programação Não Linear Inteira (PNLI) utilizam modelos matemáticos caracterizados pela presença de funções não lineares que dependem de variáveis com domínios discretos e contínuos. Ou seja, podem ser descritos pela junção de dois conceitos: (1) programação não linear (PNL), que são os problemas de otimização em que a função objetivo ou pelo menos uma das restrições envolvidas não são funções lineares; (2) programação inteira, que são aqueles em que uma ou mais variáveis de decisão são representadas apenas por valores inteiros (LACHTERMACHER, 2009).

Segundo Bronson (1985), existem diversos algoritmos desenvolvidos para a obtenção do ponto ótimo de modelos de PNLI, bem como o Método das Penalidades, Método das Direções Viáveis, Método da Programação Quadrática, Método das Variações nas Coordenadas, Método dos Gradientes Reduzidos Generalizado (GRG), entre outros.

2.7.2 Método dos Gradientes Reduzidos Generalizado (GRG)

O Método do Gradiente Reduzido Generalizado, criado por Abadie e Carpentier (1969), procura determinar a solução ótima para problemas não lineares por meio de um processo parecido com o método simplex – algoritmo que viabiliza a solução de problemas da programação linear (FRITZSCHE, 1978).

Segundo Martínez e Santos (1995), os métodos do tipo GRG buscam melhorar o valor da função objetivo mantendo factibilidade dos iterandos. Para isso, o algoritmo do GRG inicia em um ponto de partida qualquer, chamado de solução viável inicial, e se desloca para outras direções viáveis, resultando em novas soluções melhores que

a inicial, o processo continua até que o algoritmo alcance um ponto em que não haja direção viável na qual o seu deslocamento resulte na melhora da função objetivo.

Esse método é o procedimento utilizado pelo Solver – software para programação matemática integrada à planilha eletrônica do *Microsoft Excel* – para a resolução de problemas de programação não lineares.

3 METODOLOGIA

A base para o desenvolvimento da linha de raciocínio adotada em uma pesquisa é o método científico, que tem como objetivo primordial a descoberta de respostas para problemas mediante a utilização de procedimentos intelectuais e técnicos (GIL, 1999). O presente trabalho, visto que apresenta natureza aplicada à solução de um problema específico, focando em descrever e explicar fenômenos inseridos em um contexto real, está estruturado seguindo o procedimento técnico de estudo de caso.

Segundo Morabito e Pureza (2010), para que se chegue à compreensão dos processos reais, deve-se criar um modelo que descreva de forma adequada as relações causais que possam existir na realidade. Portanto, o objetivo científico desse estudo é classificado como exploratório e descritivo, visto que, para que se chegue à solução final, primeiramente fornece informações para uma investigação mais precisa, mas também descreve de forma estruturada as características, etapas e funções da metodologia aplicada, para então traduzir matematicamente os conhecimentos gerados durante a implementação por meio de um modelo de programação não linear. Sendo assim, além de investir substancialmente no levantamento de dados qualitativos, apresenta também uma abordagem quantitativa para interpretar o evento e numericamente analisar os resultados, combinação essa que enriquece a interpretação e validação dos resultados de uma pesquisa (GIL, 2002).

De acordo com Branski, Arellano e Lima Jr. (2010), o estudo de caso é dividido em cinco etapas: Delineamento da pesquisa; Desenho da pesquisa; Preparação e coleta de dados; Análise dos casos e elaboração de relatórios.

Nas etapas de pesquisa e coleta de dados, as informações foram reunidas aplicando questionários à gerência da empresa, buscando explorar e compreender todas as informações da organização, bem como o planejamento estratégico, as restrições e limitações do projeto, a previsão de demanda, a capacidade mínima esperada, o fluxograma do processo de produção e o nível de tecnologia.

A metodologia adotada para a elaboração do projeto da fábrica foi a *FacPlan*, considerando os quatro primeiros níveis – global, supra, macro e micro –, que são sistematicamente definidos com a aplicação de ferramentas e diagramas de layout. Em se tratando dos gargalos do projeto e do equilíbrio da produção, por meio da ferramenta *Solver*, do software *Microsoft Excel*, foi utilizado o método de

balanceamento com o modelo programação não linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), com o objetivo de minimizar o tempo de ciclo. Por fim, os resultados de ambos os casos foram analisados, comparados, documentados e então, utilizando o software Microsoft Visio, foram transpassados para a planta baixa do layout fabril.

4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO

Este capítulo contempla a discussão do tema apresentado por meio da demonstração das etapas para a construção de um projeto de fábrica do setor de fertilizantes líquidos, demonstrando em detalhes todo o desenvolvimento desde a coleta de dados e estruturação do projeto até elaboração final do layout e análise dos resultados.

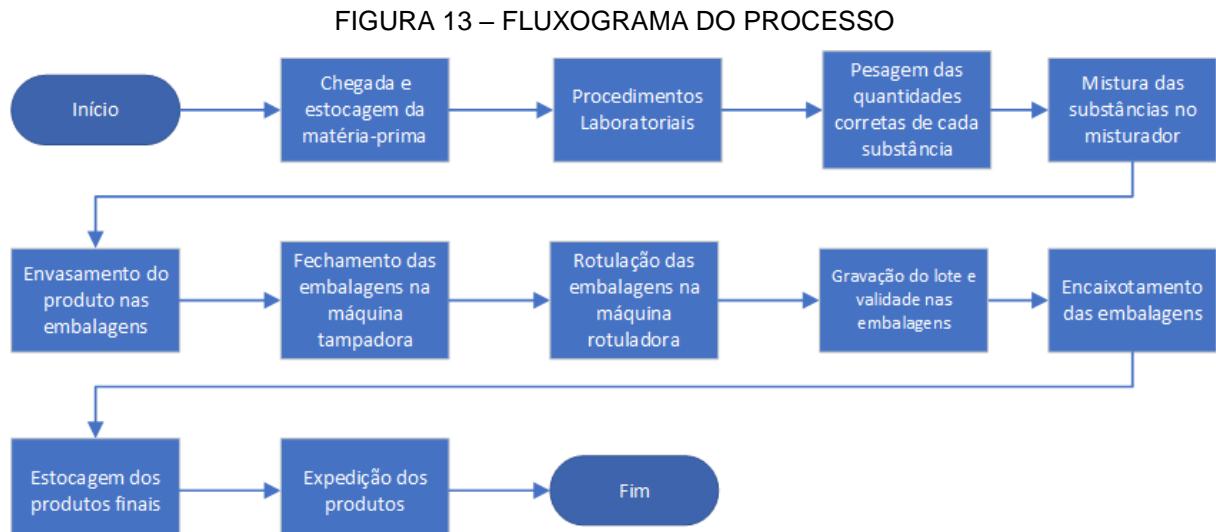
4.1 COLETA DE DADOS E ESTRUTURAÇÃO DO PROJETO

4.1.1 Características do produto e do processo

O fertilizante é o principal item no custo de produção da maioria das culturas agrícolas, portanto, a decisão de compra desse item geralmente ocorre de maneira antecipada com o objetivo de aumentar o poder de negociação de preços. À vista disso, o sistema de produção inicia-se com as demandas do cliente final, o que contribui para uma redução de perdas e desperdícios, porém, em contrapartida, também exige grande atenção na elaboração de um planejamento e controle de produção que atenda as grandes oscilações de demanda por conta da sazonalidade presente no setor, visando respeitar os prazos de entregas e a capacidade produtiva da fábrica, bem como mitigar a ociosidade de recursos.

O sistema de produção que atende as características citadas acima e, portanto, se enquadra para o processo em estudo, é o intermitente, caracterizado pelo processo em lotes (*batch shop*). Em geral, o sistema segue um fluxo praticamente linear e é reconhecido pela pouca variedade e consequente possibilidade de volumes médios ou grandes de produção. Além disso, outra particularidade importante é parada ao final de cada lote, realizando a reposição ou troca do material para a produção dos demais produtos.

A empresa apresenta produtos específicos para o cultivo de grãos que podem ser comercializados em quatro diferentes tamanhos de embalagens: um, cinco, vinte e, principalmente, dez litros. Todos seguem o mesmo processo de produção representado na FIGURA 13, diferenciando apenas por suas formulações.



FONTE: A autora (2021).

O processo inicia com a chegada, descarregamento e estocagem das matérias-primas – que passam por diferentes procedimentos laboratoriais, bem como testes para verificação de suas propriedades químicas. As substâncias já devidamente examinadas são então pesadas em uma balança eletrônica de acordo com a formulação pré-determinada para cada produto, garantindo que a mistura fique dentro dos padrões de qualidade estabelecidos.

Na sequência, as matérias-primas são adicionadas e diluídas no tanque misturador, que rotaciona até que o produto se torne homogêneo. O tanque misturador é ligado à máquina de envase por uma bomba de transferência e tubos que transportam continuamente os líquidos do tanque até os tubos da envasadora, que pode conter diversas quantidades de bombas com diferentes tamanhos de bicos de enchimento.

Após o preenchimento das embalagens, elas seguem para que sejam devidamente rosqueadas – processo que pode ser realizado por uma rosqueadora manual ou por uma máquina tampadora automática, dependendo do nível de tecnologia desejado. Assim que as embalagens estão lacradas, elas seguem em linha para a rotuladora de embalagens e posteriormente para a máquina datadora, que grava o lote de fabricação e a data de validade do produto. Por fim, é feito o encaixotamento das embalagens que agrupa cerca de quatro embalagens de dez litros em uma única caixa, que é estocada junto aos demais produtos acabados até que ocorra o processo de expedição e transporte.

4.1.2 Previsão de demanda e definição da capacidade produtiva da fábrica

Atualmente a produção é totalmente terceirizada, ou seja, é completamente dependente da disponibilidade e capacidade da companhia parceira, o que limita a expansão do negócio e confronta o alto potencial de crescimento da empresa, que é constatado pela previsão de demanda desenvolvida pelos gerentes. O método de previsão utilizado foi a pesquisa de campo – que é o estudo onde se observa, faz a coleta de dados, analisa e interpreta os resultados referentes ao seu objeto de estudo diretamente do seu ambiente natural ou da realidade onde ele ocorre. Ou seja, a determinação da estimativa de vendas foi realizada por meio da apresentação do produto e aplicação de enquetes diretamente com os proprietários das lavouras nas mais diversas regiões do Brasil, ou seja, diretamente com os possíveis clientes finais. Dessa forma, uma previsão quantitativa e qualitativa foi desenvolvida, descrevendo tanto em números quanto em características que definem pessoas para o consumidor principal da empresa. A previsão para o ano de 2023 foi plotada no GRÁFICO 1.

GRÁFICO 1 – PREVISÃO DE PRODUÇÃO PARA O ANO DE 2023



FONTE: A autora com base nos dados fornecidos pela empresa (2021).

Os dados da previsão demonstram uma expectativa de produção de 300 mil litros para o ano de 2023, portanto, buscando atender a procura de seus produtos, a

empresa aderiu em seu planejamento estratégico a construção de uma nova fábrica. Inicialmente, os maquinários dessa fábrica devem ser planejados para atender totalmente as necessidades de produção até o ano de 2026, sem a necessidade de contar com apoio de terceiros, portanto, considerando que a empresa objetiva um crescimento de 10% das vendas totais até o ano de 2026 e que o mês de pico de produção (setembro) pode representar até 30% da produção anual total, espera-se uma capacidade mensal de 100 mil litros. Entretanto, as dimensões da nova fábrica devem permitir futuras expansões e aquisições de novos maquinários.

4.1.3 Maquinários e Níveis de Tecnologia

O processo de definição do nível de tecnologia da nova fábrica baseou-se nas restrições financeiras da empresa, nos requisitos do sistema produtivo, e nas estratégias e planejamento de produção, bem como considerou a capacidade definida de 100 mil litros mensais. O cenário atual do modelo de negócio da empresa – que é base para o planejamento da fábrica – é caracterizado por uma grande oscilação da demanda por conta da sazonalidade dos produtos, ou seja, é mais vantajoso para esse modelo trabalhar com a realocação dos recursos entre os setores ou até mesmo com a implementação de turnos de produção nos meses de picos de produção do que o grande investimento em maquinários de última tecnologia que podem ficar ociosos em períodos de baixa de vendas. Além disso, a capacidade de produção previamente estabelecida não é muito alta e o processo apresenta baixa variabilidade.

À vista disso, o nível de tecnologia adotado para a fábrica no geral é o semiautomático. Entretanto, é válido apontar que a tecnologia requerida pode alternar entre as diferentes operações. Por exemplo, datadores totalmente automáticos não exigem um investimento alto e requerem apenas a revisão e reposição de tinta entre longos períodos de tempo, portanto têm um ótimo custo-benefício em comparação com o processo de impressão e gravação manual dos lotes, que exige muito tempo e movimentações entre setores. Por outro lado, máquinas de rosqueamento apresentam alta complexidade tecnológica e, portanto, alto investimento, não sendo viável a aquisição de equipamentos de tecnologia de ponta se compararmos com um rosqueador manual por exemplo, que necessita de apenas um operador sendo esse capaz de tampar uma embalagem em poucos segundos. A tabela a seguir apresenta

todos os maquinários que devem ser adquiridos na fábrica, bem como as suas respectivas descrições e os principais pontos que nortearam a tomada de decisão.

TABELA 1 – DEFINIÇÃO DOS MAQUINÁRIOS

Equipamento	Descrição	Pontos de decisão
<ul style="list-style-type: none"> • Tanque Misturador:  <p>FONTE: Yangzhou Haoxiang Light Industry (2021).</p>	<p>Equipamento contempla: tanque com capacidade de 2000 litros; hélice rotatória para homogeneizar líquidos; bomba e tubos de transferência; escada e plataforma metálica para o acesso à cavidade superior do tanque.</p>	<p>Durabilidade; facilidade na limpeza e remoção de resíduos que possam prejudicar a pureza do produto; alta flexibilidade da alocação do maquinário no layout fabril.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Máquina de envase:  <p>FONTE: A Packaging Systems - APACKS (2021).</p>	<p>Equipamento de envase semiautomático que com bicos de enchimentos diversos e dimensões (largura e altura) ajustáveis para cada tamanho de embalagem. Número de bombas a definir de acordo com o balanceamento da linha.</p>	<p>Precisão do processo; flexibilidade dos bicos e das dimensões do equipamento; agilidade de enchimento.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Rosqueadora manual:  <p>FONTE: Cetro Soluções em Embalagens (2019).</p>	<p>Equipamento pneumático com suporte de apoio para descanso e encaixe de tampas ajustáveis.</p>	<p>Processo rápido e de baixo custo.</p>

<ul style="list-style-type: none"> • Rotuladora 	<p>Equipamento de rotulagem plana para alocação em esteira.</p>	<p>Processo automatizado e em linha; flexibilidade de tamanhos de embalagens e rótulos.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Datadora 	<p>Máquina datadora industrial por jato de tinta contínuo com sensores. Acoplada a esteira da linha, com velocidade máxima de 6,5m/s.</p>	<p>Processo automatizado; facilidade de instalação; dimensões pequenas; processo ágil.</p>

FONTE: A autora (2021).

A definição inicial do nível de tecnologia de cada operação apresentada na TABELA 1 tem uma abordagem qualitativa e é base para a definição do layout fabril e cálculos de balanceamento da linha de produção. Com resultado do balanceamento, essas decisões são verificadas e analisadas de forma quantitativa. De acordo com os gargalos encontrados, os maquinários podem ser ajustados, tanto em quantidade de recursos quanto em tecnologia, até que seja definido o projeto ideal para a realidade da empresa em estudo.

4.1.4 Padrão por minuto das operações

Em decorrência da pandemia de COVID-19, foi impossibilitada a realização de estudos de tempos e movimentos para a definição e alocação das operações dentro do ambiente fabril. Portanto, para a realização do presente estudo, a cronoanálise foi substituída pelos tempos padrões coletados em uma entrevista com o responsável da produção de uma fábrica de produtos de limpeza majoritariamente semiautomática, que segue o mesmo fluxo produtivo da empresa em análise e utiliza os mesmos equipamentos selecionados na TABELA 1.

As atividades de procedimentos laboratoriais, estocagem de matéria-prima e de produtos acabados e a expedição dos produtos ocorrem de maneira independente do restante do processo produtivo e, portanto, seus tempos não foram contabilizados nos cálculos para definição do layout fabril. Além disso, apesar das previsões de produção serem contabilizadas em litros, devem ser utilizados para base dos cálculos unidades de embalagens, portanto, a unidade de medida para todos os cálculos desse estudo será a embalagem de 10 litros, que é a dimensão mais recorrente.

TABELA 2 – PADRÃO-MINUTO DE CADA OPERAÇÃO

Operação	Produção	Padrão-minuto (un/min)
1. Pesagem das substâncias	600 embalagens a cada 900 segundos	40
2. Misturar substâncias (tanque misturador de 2000 litros)	600 embalagens a cada 5400 segundos	6,67
3. Enchimento das embalagens (máquina de envase com uma bomba)	1 embalagem a cada 60 segundos	1
4. Rosqueio manual das embalagens	1 embalagem a cada 15 segundos	4
5. Rotulagem das embalagens na máquina rotuladora	1 embalagem a cada 20 segundos	3
6. Gravação do lote de fabricação e data de validade na máquina datadora	1 embalagem a cada 20 segundos	3
7. Encaixotamento manual	4 embalagens a cada 60 segundos	4

FONTE: A autora (2021).

Completando a coleta e análise de todos os dados necessários – bem como o planejamento estratégico da empresa, descrição do sistema de produção, mapeamento e detalhamento do fluxo produtivo, definição do nível de tecnologias e os estudos de tempos das operações –, a etapa de estruturação do projeto é finalizada e tem-se documentado todas as informações requeridas para o planejamento de fábrica seguindo os passos da metodologia *FacPlan*.

4.2 ANÁLISE E ELABORAÇÃO DO PROJETO DE FÁBRICA

4.2.1 Nível Global

O nível global define a localidade da instalação no âmbito mais amplo, portanto é o momento em que devem ser definidos itens como continente, país, estado, cidade, rua e terreno, de acordo com as estratégias da empresa bem como as características do negócio e considerando também as diversas variáveis externas – bem como estabilidade da economia local, disponibilidades e custos de mão-de-obra, cotas de exportação e importação, clima, restrições governamentais e questões ambientais.

No caso em estudo, foi selecionado um terreno de 936 m² localizado em um grande polo industrial do estado do Paraná, que se destaca pela presença de diversas empresas do setor agroindustrial e pelo alto estímulo ao mercado do agronegócio. O principal ponto de decisão da localidade foi o incentivo municipal com a concessão do terreno e a isenção de tributos por um período determinado, com a contraprestação de que a empresa, ao instalar-se no território, promoverá a geração de empregos diretos e indiretos, estimulando a economia local. Outro fator importante para a decisão é a proximidade de atuais e possíveis clientes e fornecedores.

4.2.2 Nível Supra

No nível supra toda a estrutura arquitetônica é definida em conjunto com o arquiteto e engenheiro civil responsável. No caso em estudo, a estrutura da construção será de alvenaria de vedação, visto que proporciona uma grande durabilidade, é um material barato e de grande versatilidade – o que a possibilita a flexibilização de plantas e layouts, promovendo um melhor aproveitamento dos espaços. Ademais, obras de alvenaria geralmente são descomplicadas e até mesmo rápidas, visto que esse material, por ser amplamente utilizado no Brasil, facilita a compatibilização de projetos (arquitetônico, hidráulico e elétrico), além de apresentar uma grande disponibilidade de mão-de-obra. A normatização de utilização e qualidade da alvenaria convencional é bem consolidada, contemplando diversas regulamentações que oferecem maior segurança e praticidade, bem como a ABNT NBR 12118/2013 “Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria – Método de Ensaio”.

Quanto os requisitos do projeto, apenas uma edificação é necessária, sendo essa composta pelo espaço principal e um mezanino, além de um amplo espaço de estacionamento e área externa de expedição, que deve acomodar grandes caminhões para o transporte de matérias-primas e produtos finais. As necessidades básicas de cada espaço foram definidas em conjunto com a gerencia da empresa, considerando as dimensões dos maquinários, recomendações de espaços para circulação e operações, bem como medidas extras para possíveis expansões. Os resultados foram documentados utilizando o modelo de diagrama de necessidades de espaço proposto por Richard Muther e John D. Wheeler (2012), que deverá ser base para o dimensionamento dos macros e micros espaços do layout, bem como para o direcionamento dos projetos estrutural, hidráulico e elétrico, desenvolvidos pelos engenheiros civil e eletricista responsáveis.

FIGURA 14 – DIAGRAMA DE NECESSIDADES DO ESPAÇO

FOLHA DAS ÁREAS E CARACTERÍSTICAS DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS NECESSÁRIAS									
	Nome do Setor	Área aproximada (m ²)	Carga Máxima Teto	Carga Máxima Piso	Espac Minimo da Coluna	Água e Drenos	Vap	Ar Comprimido	Perigos de incêndio	Ventilação Especial
Laboratório	30				I	-	-	O	-	-
Estoque de matérias-primas	20				-	-	-	-	-	-
Tanque Misturador	20				O	-	-	-	-	-
Máquina de Envase	10				-	-	-	-	-	-
Rosqueadora	5				-	-	-	-	-	-
Rotuladora	5				-	-	-	-	-	-
Datadora	5				Cálculos de responsabilidade do setor de engenharia civil.		-	-	-	-
Estoque de produtos finais	60						-	-	-	-
Almoxarifado	15				-	-	-	-	-	-
Escritório	50				-	-	-	-	-	-
Sala de reunião	20				-	-	-	-	-	-
Area de Expedição	400				-	-	-	-	-	-
Cozinha e Refeitório	35				A	-	-	-	-	-
Banheiro 1	5				A	-	-	-	-	-
Banheiro 2	5				A	-	-	-	-	-

Referências e Observações:

Voltagem maquinário: 220V trifásico

FONTE: A autora (2021).

4.2.3 Nível Macro e Micro

O nível macro estabelece a alocação dos diferentes departamentos dentro da organização, já o nível micro delimita a localização dos postos de trabalho em cada departamento, ou seja, organiza os equipamentos e mobiliário dentro de cada setor estabelecido no nível macro. O presente estudo tem todos os setores como objeto de análise para o nível macro, porém, apenas o setor de produção é analisado no nível micro.

O macro e micro espaços foram estudados em conjunto, visto que ambos foram determinados respeitando todas as relações entre áreas e operações – de acordo com o fluxograma apresentado no item 4.1.1 e com as demais informações coletadas na estruturação do projeto. Para tanto, as ferramentas de diagrama de relações e diagrama de *spaghetti* foram utilizadas para alocar cada setor e equipamento no ambiente disponível, além do método de balanceamento de linha, que foi aplicado com o objetivo de equilibrar os recursos disponíveis e reduzir gargalos.

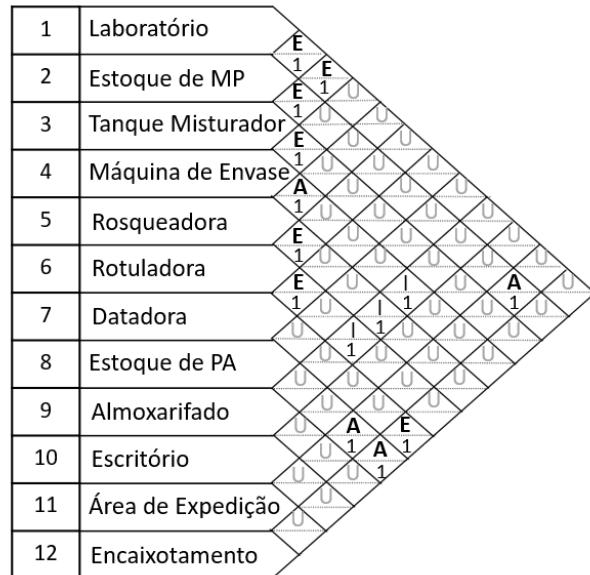
4.2.3.1 Diagrama de relações

O diagrama de afinidade ou diagrama de relações foi aplicado com o objetivo de identificar a relação de importância de proximidade entre cada setor e estação de trabalho, servindo como uma verificação simples e eficiente para evitar que alguma relação seja incluída no planejamento, sendo assim, é um norteador para a tomada de decisão no quesito alocação de cada operação no espaço disponível. A figura X representa o resultado diagrama de afinidade da fábrica.

FIGURA 15 – DIAGRAMA DE AFINIDADE

Valor	Proximidades
A	Absolutamente Necessário
E	Especialmente Importante
I	Importante
O	Proximidade Normal
U	Sem importância
X	Não Desejável

Cód.	Razão
1	Agilizar o processo e diminuir o fluxo devido à frequência de interações entre as áreas

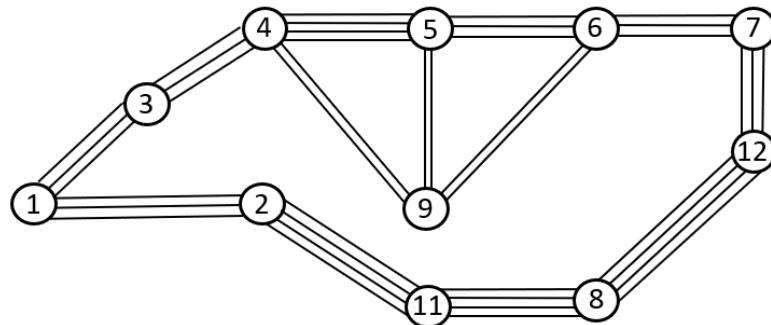


FONTE: A autora (2021)

4.2.3.2 Diagrama de Spaghetti

Com o diagrama de afinidades construído, foi então traduzido em um diagrama de *spaghetti*, com o objetivo de representar a movimentação física dos itens de forma mais visual e esquemática até que se chegue ao formato básico do layout. As relações “absolutamente necessárias” são representadas por quatro linhas; as “especialmente importantes” são representadas por três linhas; e as “importantes” são representadas por duas linhas; as relações “sem importância” não são esquematizadas.

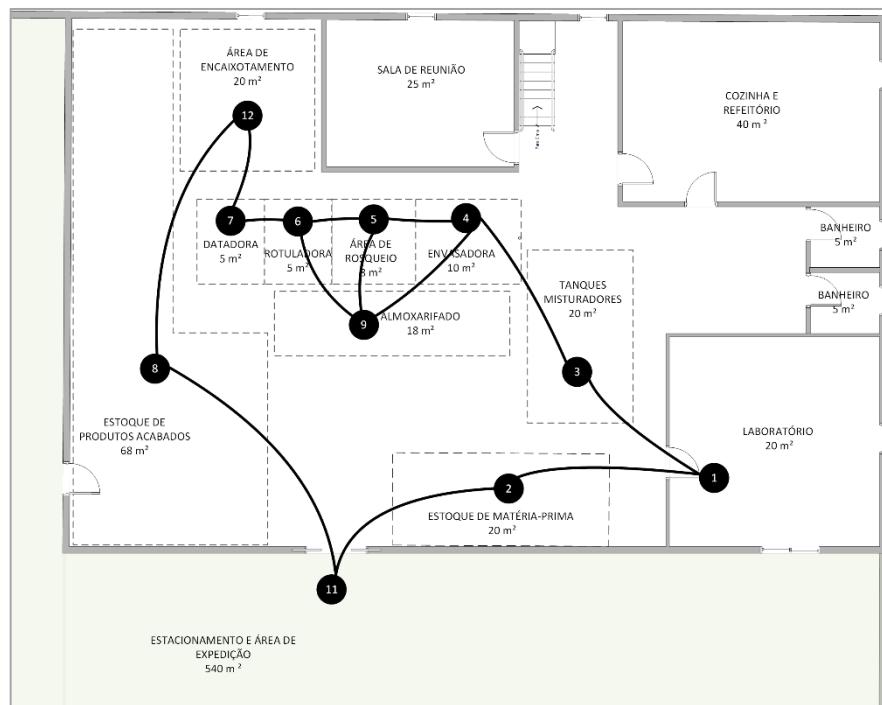
FIGURA 16 – DIAGRAMA DE SPAGHETTI



FONTE: A autora (2021)

O diagrama foi então transmitido para dentro do espaço físico disponível, alocando cada setor formando o layout básico da fábrica e esquematizando o fluxo de produção ao desenhar o caminho percorrido entre as operações. O mapofluxograma está representado na figura a seguir e em tamanho maior no ANEXO 1.

FIGURA 17 – MAPOFLUXOGRAMA



FONTE: A autora (2021)

4.2.3.3 Balanceamento da Linha

O processo de produção em análise – representado no fluxograma da FIGURA 13 – apresenta as seguintes características: (1) não compartilhamento de maquinário entre diferentes operações; (2) todos os processos são necessariamente dependentes de sua operação precedente. Nesse sentido, apesar de seu processo não ser inteiramente interligado por esteiras lineares, seu fluxo segue uma sequência única e sem bifurcações e, consequentemente, o estudo de balanceamento de linha torna-se a ferramenta ideal para reduzir a ociosidade de recursos e equilibrar a linha de produção, definindo o número ideal de postos de trabalho para cada operação e avaliando o desempenho do maquinário selecionado no item 4.1.3. Para o estudo do balanceamento da linha de produção foram consideradas os padrões de produção por minuto das 7 operações apresentadas na TABELA 2.

Foi desenvolvido um modelo de programação não linear inteira para calcular a solução ótima do problema, que envolve minimizar o tempo de ciclo da produção ao encontrar o padrão-minuto de produção da linha (em unidades por minuto) e o número ideal de recursos a serem alocados em cada posto de trabalho – sejam esses recursos a quantidade de maquinário ou número de funcionários.

Como a capacidade mensal desejada é de 100 mil litros, em um mês com 21 dias úteis seria necessário a produção de 4,76% da produção mensal total. Supondo que a empresa deseja cobrir a possibilidade de um dia parado no mês para eventuais manutenções de máquinas por exemplo, seria necessária uma capacidade diária de 5% da produção mensal total, ou seja, 500 embalagens de 10 litros. Com o objetivo de evitar investimentos em recursos desnecessários, o modelo considera em sua programação uma restrição que iguala a capacidade diária de produção à 500 embalagens. A seguir serão descritos os parâmetros e as variáveis de decisão do modelo:

Variáveis de decisão:

x_i - Número de operadores alocados à operação i ;

P - Padrão-minuto da linha, em número de embalagens de 10 litros produzidas por minuto;

Parâmetros:

p_i - Padrão-minuto da operação i em números de pares/hora;

Logo, o modelo é o seguinte:

$$\text{Min } TC = \left(\frac{1}{P}\right) \sum_{i=1}^7 x_i \quad (11)$$

$$\text{s. a} \quad 480 P = 500 \quad (12)$$

$$p_i x_i \geq P \quad i = 1, \dots, 7 \quad (13)$$

$$x_i \geq 1 \quad i = 1, \dots, 7 \quad (14)$$

$$P \geq 0 \quad (15)$$

$$x_i \text{ inteiro,} \quad i = 1, \dots, 7 \quad (16)$$

A equação (11) representa a função-objetivo de minimizar o tempo de ciclo (TC) da linha; a restrição indicada na equação (12) iguala a capacidade de produção

diária a 500 embalagens de 10 litros considerando 480 minutos de trabalho; a equação (13) assegura que cada estação de trabalho tem padrão-minuto maior ou igual ao padrão-minuto da linha; a restrição (14) certifica que pelo menos uma estação deve ser alocada para operação; por fim, as equações (15) e (16) definem, respectivamente, o domínio das variáveis de decisão x_i e P .

O modelo foi resolvido com o suplemento Solver da ferramenta Microsoft Excel, e seus resultados são descritos na tabela a seguir.

TABELA 3 – RESULTADO DA MODELAGEM E MINIMIZAÇÃO DO TEMPO DE CICLO PARA UMA CAPACIDADE DIÁRIA DE 5000 LITROS

Número de postos de trabalho (quantidade)							Unidades por minuto	Tempo (min)
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	P	TC
1	1	2	1	1	1	1	1,04167	7,67999

FONTE: A autora (2021).

A TABELA 3 demonstra que, para o balanceamento da linha de produção atenda as restrições descritas acima, é necessário a aquisição de uma máquina envasadora de dois bicos – visto que esse é o gargalo da produção e, cumprindo com o balanceamento determinado, torna-se capaz de encher duas embalagens de 10 litros por minuto. Entretanto, a restrição da capacidade em 500 embalagens limitou o padrão-minuto da linha a um valor menor que o padrão-minuto do gargalo, isto significa que a quantidade de recursos necessários para a produção diária de 5 mil litros apresenta capacidade superior a esse valor. Ao igualarmos ao padrão-minuto da linha ao padrão-minuto da atividade gargalo, temos o resultado real do balanceamento, representado na tabela a seguir:

TABELA 4 – RESULTADO REAL DA MODELAGEM E MINIMIZAÇÃO DO TEMPO DE CICLO PARA UMA CAPACIDADE DIÁRIA DE 5000 LITROS

Número de postos de trabalho (quantidade)							Unidades por minuto	Tempo (min)
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	P	TC
1	1	2	1	1	1	1	2	4

FONTE: A autora (2021).

Com o valor real do balanceamento concluímos que a capacidade diária da fábrica é de 9600 litros. Quanto a eficiência da linha de produção, temos o resultado de 50,85% de aproveitamento dos recursos, valor calculado considerando a fórmula demonstrada abaixo, em que a capacidade efetiva (CE) é o somatório das capacidades disponíveis e a capacidade realizada (CR) é o somatório das capacidades que estão sendo efetivamente utilizadas em cada operação.

$$E = \frac{CR}{CE} = \frac{\sum_{i=1}^7 (P/p_i)}{\sum_{i=1}^7 x_i} = 50,58\%$$

4.2.3.4 Adaptação do balanceamento de linha para expansões futuras

Como é um requisito da empresa que as dimensões de cada espaço da fábrica sejam capazes de alocar futuras expansões, o modelo de programação não linear inteira foi ajustado – aumentando a capacidade diária do sistema – com o objetivo de analisar e verificar se as dimensões e tecnologias escolhidas são adequadas para futuras expansões na fábrica. Para isso, o modelo limitou o padrão linha da fábrica a um valor simbólico de 12 unidades por minuto – que seria equivalente a uma capacidade mensal total de mais de 1,2 milhão de litros considerando um mês com 21 dias úteis com 8 horas diárias, ou seja, muito acima da capacidade desejada de 100 mil litros. Assim, é garantida a disponibilidade de espaço para expansões, mas coloca-se um limite alegórico que evite resultados fora da realidade da empresa. Além disso, com o objetivo de melhorar a eficiência da fábrica, o modelo também restringe que o aproveitamento de recursos, ou seja, a eficiência da linha de produção, seja maior ou igual a 80%. A seguir serão descritos os parâmetros e as variáveis de decisão do modelo:

Variáveis de decisão:

x_i - Número de operadores alocados à operação i ;

P - Padrão-minuto da linha, em número de embalagens de 10 litros produzidas por minuto;

Parâmetros:

p_i - Padrão-minuto da operação i em números de pares/hora;

Logo, o modelo é o seguinte:

$$\text{Min } TC = \left(\frac{1}{P}\right) \sum_{i=1}^7 x_i \quad (17)$$

$$\text{s. a} \quad 0,8 \sum_{i=1}^7 x_i \leq \sum_{i=1}^7 \left(\frac{P}{p_i}\right) \quad (18)$$

$$p_i x_i \geq P \quad i = 1, \dots, 7 \quad (19)$$

$$x_i \geq 1 \quad i = 1, \dots, 7 \quad (20)$$

$$P \leq 12 \quad (21)$$

$$P \geq 0 \quad (22)$$

$$x_i \text{ inteiro, } i = 1, \dots, 7 \quad (23)$$

A equação (17) representa a função-objetivo de minimizar o tempo de ciclo (TC) da linha; a restrição indicada na equação (18) garante a utilização mínima de 80% dos recursos alocados, uma vez que restringe os recursos mínimos necessários (lado direito) como sendo de maior valor que a eficiência desejada dos recursos alocados (lado esquerdo); a equação (19) assegura que cada estação de trabalho tem padrão-minuto maior ou igual ao padrão-minuto da linha; a restrição (20) certifica que pelo menos uma estação deve ser alocada para operação; a equação (21) limita a 12 unidades o padrão por minuto da linha; por fim, as restrições (22) e (23) definem, respectivamente, o domínio das variáveis de decisão x_i e P .

O modelo foi resolvido com o suplemento Solver da ferramenta Microsoft Excel, e seus resultados são descritos na tabela a seguir.

TABELA 5 – RESULTADO DA MODELAGEM E MINIMIZAÇÃO DO TEMPO DE CICLO SEM RESTRIÇÃO DE CAPACIDADE DIÁRIA

Número de postos de trabalho (quantidade)							Unidades por minuto	Tempo (min)
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	P	TC
1	2	12	3	4	4	3	12	2,4167

FONTE: A autora (2021).

A TABELA 5 demonstra que, para o balanceamento ótimo da linha de produção, seriam necessários 1 funcionário para a pesagem das substâncias, 2 tanques de mistura com capacidade para dois mil litros, 1 máquina semiautomática de envase com 12 bicos, 3 funcionários e rosqueadores pneumáticos, 4 máquinas de rotulagem e datadores, resultando em uma linha capaz de produzir 12 embalagens de 10 L por minuto com um tempo de ciclo de 2,42 minutos. Esse resultado demonstra que, além do investimento em uma envasadora maior e a aquisição de mais um tanque misturador, a longo prazo os seguintes investimentos serão vantajosos: (1) equipamento de rotulagem quatro vezes mais rápido; (2) esteira mais ágil, que não limite a máquina datadora, permitindo a gravação do lote de uma embalagem a cada 5 segundos; (3) troca dos rosqueadores manuais por uma máquina tampadora mais automatizada, que geralmente é capaz de selar uma embalagem em apenas um segundo.

Se a fábrica for ajustada de acordo com esse o balanceamento e melhorias propostas, a capacidade diária da fábrica aumentaria para 57600 litros. Quanto a eficiência da linha de produção, aumentaria para 96,89% de aproveitamento dos recursos.

$$E = \frac{CR}{CE} = \frac{\sum_{i=1}^7 (P/p_i)}{\sum_{i=1}^7 x_i} = 96,89\%$$

4.2.4 Layout final

Os resultados dos balanceamentos da produção possibilitaram a alocação dos recursos e equipamentos dentro dos espaços definidos com o mapofluxograma do ANEXO 1, formando dois cenários de layout final: o primeiro balanceamento – que restringe a capacidade diária a 5000 litros, exigindo menor quantidade de recursos e, consequentemente, menor investimento financeiro –, resultou na representação física do layout demonstrado no ANEXO 2. Já o segundo balanceamento – que é ideal para futuras expansões visto que sua linha tem eficiência de 96,89%, aumentando a capacidade para 57000 litros –, resultou na representação física do layout demonstrado no ANEXO 4.

Em ambas as plantas, os mobiliários representados nas áreas do laboratório, banheiros, sala de reunião, cozinha e escritório são apenas exemplos ilustrativos e

seus arranjos internos não fizeram parte do estudo em questão. Ademais, como citado no nível supra de planejamento (vide item 4.2.2), o edifício contempla um mezanino, como demonstrado no ANEXO 3.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A finalidade deste estudo foi constituir o projeto e arranjo físico de uma fábrica de fertilizantes, desde um nível global até o micro, respeitando a expectativa de crescimento da organização e obtendo, também, o balanceamento do fluxo produtivo que minimize o tempo de ciclo da linha. Encontrar este ponto de equilíbrio é uma atividade complexa pois considera diversos requisitos e restrições. Com o objetivo de reduzir as incertezas geradas pela diversidade de variáveis que permeiam essa tomada de decisão, modelos de otimização, aliados à um eficiente e estruturado planejamento, vêm sendo cada vez mais utilizados por grandes empresas.

Os resultados obtidos demonstram que a aplicação da metodologia deste estudo de caso se mostrou suficiente para embasar a realização de todos os procedimentos. A aplicação do modelo *FacPlan* foi satisfatória para o planejamento do projeto de fábrica, principalmente por considerar questões estratégicas em suas etapas, permitindo um maior alinhamento com a realidade e necessidades da empresa. Além disso, o balanceamento da produção por meio da programação linear não inteira (PLNI) permitiu a otimização dos fluxos e a minimização do tempo de ciclo dentro dos parâmetros e restrições especificados para dois diferentes cenários: (1) capacidade produtiva limitada buscando um menor investimento em quantidade de recursos e maior alinhamento com a demanda atual; (2) sugestão de expansões futuras e aumento da capacidade.

Portanto, a pesquisa, além de apresentar o layout fabril final, também verificou que as dimensões inicialmente planejadas serão capazes de acomodar possíveis ampliações na fábrica e ainda sugeriu melhorias do nível de tecnologia para as operações gargalo. O balanceamento programado para futuras expansões demonstrou-se 46,31% mais eficiente que o layout inicial proposto, entretanto, por apresentar capacidade produtiva tão superior à demanda, comprova que a empresa ainda se encontra em nível inicial de maturidade e, portanto, deve primeiramente investir no setor de vendas e na expansão do mercado para posteriormente investir nas vantajosas ampliações fabris apresentadas neste estudo.

Em resumo, o objetivo deste trabalho foi atingido, pois cumpriu com todas as suas propostas de planejar os quatro primeiros níveis do *FacPlan*, balancear o fluxo produtivo, analisar a eficiência da linha, apontar recomendações e direcionamentos para expansões futuras e desenhar a planta final da fábrica.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de modelos de otimização para calcular o balanceamento de outras linhas de produção e a abordagem *FacPlan* para o planejamento estratégico de projetos de fábrica. Adicionalmente, sugere-se a realização do estudo de tempos e movimentos (cronoanálise), buscando avaliar de forma mais confiável o tempo gasto em cada atividade. Essa análise, além de impactar diretamente na minimização do tempo de ciclo da produção, também oportuniza a implementação do nível que não foi abordado nesse estudo, o sub-micro – que determina a melhor organização e configuração de cada posto de trabalho. É orientado, também, que se complete o *FacPlan* ao realizar esta última etapa, contribuindo para que se obtenha ainda mais benefícios – que vão desde melhorias ergonômicas até minimizações do tempo das operações e, consequentemente, aumento de produtividade.

REFERÊNCIAS

- ABADIE, J., CARPENTIER, J. **Generalization of the Wolfe Reduced Gradient Method to the Case of Nonlinear Constraints.** In: Optimization. New York: R. Fletcher (ed), Academic Press, 1969.
- ADJISKI, VANCHO. **Methodology for simulation of truck haulage in mines for underground exploitation**, 2017.
- ARORA, J. S. **Introduction to optimum design**. 4. ed. Iowa: Elsevier, 2017.
- BALLOU, RONALD H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BECKER, C; SCHOLL, A. **A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing**. European journal of operational research, 2006.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. **A classification of assembly line balancing problems**. European Journal of Operational Research, 2007.
- BRANSKI, R. M.; ARELLANO, R.C.F; LIMA JR, O. F. **Metodologia de Estudo de Casos Aplicada à Logística**. In: XXIV ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, 2010, Salvador. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, 2010.
- BRONSON, R., **Pesquisa Operacional**. Editora McGraw-Hill, 1985.
- CHWIF L; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teorias e Aplicações**. São Paulo: Ed. Dos Autores, 2006.
- CNA BRASIL. **PIB do Agronegócio alcança participação de 26,6% no PIB brasileiro em 2020**. Superintendência técnica da CNA e Cepea. Disponível em: <<https://www.cnabrasil.org.br/boletins/pib-do-agronegocio-alcanca-participacao-de-26-6-no-pib-brasileiro-em-2020#:~:text=O%20PIB%20do%20agroneg%C3%B3cio%20brasileiro,%2C5%25%20em%202019>>
- CORRÊA, H. L. CORRÊA, C.A. **Administração de produção e de operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 4. ed. – São Paulo: Atlas, 2019.
- CORRÊA, H. L; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção. MRP II / ERP - Conceitos, Uso e Implantação**. 4^a Edição, Atlas, 2001.
- CURY, ANTONY. **Organização & Métodos: uma visão holística**. São Paulo: Atlas, 2007.
- DESSOUKY, M. M.; ADIGA, S.; PARK, K. **Design and scheduling of flexible assembly lines for printed circuit boards**. The International Journal of Production Research, 1995.

- FERNANDES, F.C.F; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e controle da produção, dos fundamentos ao essencial.** São Paulo: Atlas, 2010.
- FRITZSCHE, H. **Programação Não-Linear: análise e métodos.** Editora da Universidade – USP, 1978.
- GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações.** 8. ed. São Paulo: Thomson, 2005.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- HARRINGTON, H.J.; TUMAY, K. **Simulation modeling methods.** Nova York: McGraw- Hill, 2000.
- HEPFNER, RAFEL. **Planejamento de Layout Estudo de Caso em um Laboratório Metalúrgico.** Porto Alegre, 2008.
- HAX, A. C.; CANDEA, D. I. **Production and inventory management.** New Jersey: Prentice Hall, 1984.
- JOHNSON, L. A. MONTGOMERY, D. C. **Operations Research in Production Planning, Scheduling, and Inventory Control.** 1^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- JOHNSON, R. A. & WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis.** 3rd ed. New Jersey, Prentice-Hall International, Englewood Cliffs, 1992.
- KUMAR, D. M. **Assembly line balancing: a review of developments and trends in approach to industrial application.** Global Journal of Research In Engineering, 2013.
- LACHTERMACHER, GERSON. **Pesquisa operacional na tomada de decisões.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- LAW, A.M.; KELTON, W.D. **Simulation modeling and analysis.** 3. ed. Nova York: McGraw Hill, 2000.
- LEE, QUARTERMAN. **Projeto de instalações e local de trabalho.** São Paulo, IMAM, 1998.
- LUZZI, A. ANTÔNIO. **Uma abordagem para projetos de layout industrial em sistemas de produção enxuta: um estudo de caso.** Porto Alegre: UFRGS, 2004.
- MANTOVANI, C.A. **Uma Sistemática de Gestão da Capacidade Apoiada na Análise da Melhoria dos Processos para Prestadoras de Serviços de Telecomunicações.** Tese de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2009.

MARTÍNEZ, J.M.; SANTOS, S.A. **Métodos computacionais de otimização.** Campinas, SP: IMEEC/UNICAMP, 1995.

MARTINS, Petrônio G; LAUGENI, Fernando Piero. Administração da produção. São Paulo: Saraiva, 2005. pp. 226-260.

MORABITO, R.; PUREZA, V. **Modelagem e simulação.** In: CAUCHICK MIGUEL, P.A.C. et al. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MUTHER, RICHARD. **Planejamento do layout: Sistema SLP.** Editora Edgard Blucher LTDA, São Paulo, 1978.

MUTHER, R; WHEELER, J.D. **Planejamento sistemático e simplificado de layout.** São Paulo: IMAM, 2000.

MUTHER, R; WHEELER, J.D. **Planejamento sistemático e simplificado de layout.** 3. Ed. – São Paulo: IMAM, 2012.

NEUMANN, C; SCALICE, R. K. **Projeto de fábrica e layout.** Elsevier Brasil, 2015.

NEUMANN, C. S. R. **Projeto de Fábrica e Layout: Planejamento do micro espaço.** UFRGS, 2008. Disponível em:
[<http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/393_capitulo9_micro.pdf>](http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/393_capitulo9_micro.pdf).

OLIVEIRA, C.S. **Aplicação de técnicas de simulação em projetos de manufatura enxuta.** Estudos Tecnológicos, volume 4, set./dez. 2008

OLIVÉRIO, JOSÉ LUIZ. **Projeto de fábrica: produtos, processos e instalações industriais.** São Paulo: IBLC, 1985.

Oliveira, Ricardo & Correa, Valesca & Nunes, Luiz. **Mapeamento do fluxo de valor em um modelo de simulação computacional.** Revista Produção Online, 2014.

PEGDEN, C.D.; SHANNON, R.E.; SADOWSKI, R.P. **Introduction to simulation Using SIMAN.** 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

PINTO, R. L. **Estudo da localização de n instalações fabris em um sistema logístico.** Brasilia, 2015.

RAO, S. S. **Engineering Optimization: Theory and practice.** 4. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 2009.

ROTHLAUF, F. **Design of modern heuristics: principles and application.** Springer Science & Business Media, 2011.

SCHROEDER, R.; RUNGTUSANATHAM, M.J.; GOLDSTEING, S. **Operations Management in the Supply Chain: Decisions and Cases.** McGraw-Hill Higher Education, 2013.

SLACK, N., CHAMBERS, S., JOHNSTON, R. **Administração da Produção**, 2^a Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JONHNSTON, R. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SLACK, NIGEL; LEWIS, MICHAEL. **Operations strategy**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2003.

SILVEIRA, G. **Layout e Manufatura Celular**. Porto Alegre: UFRGS, 1998.

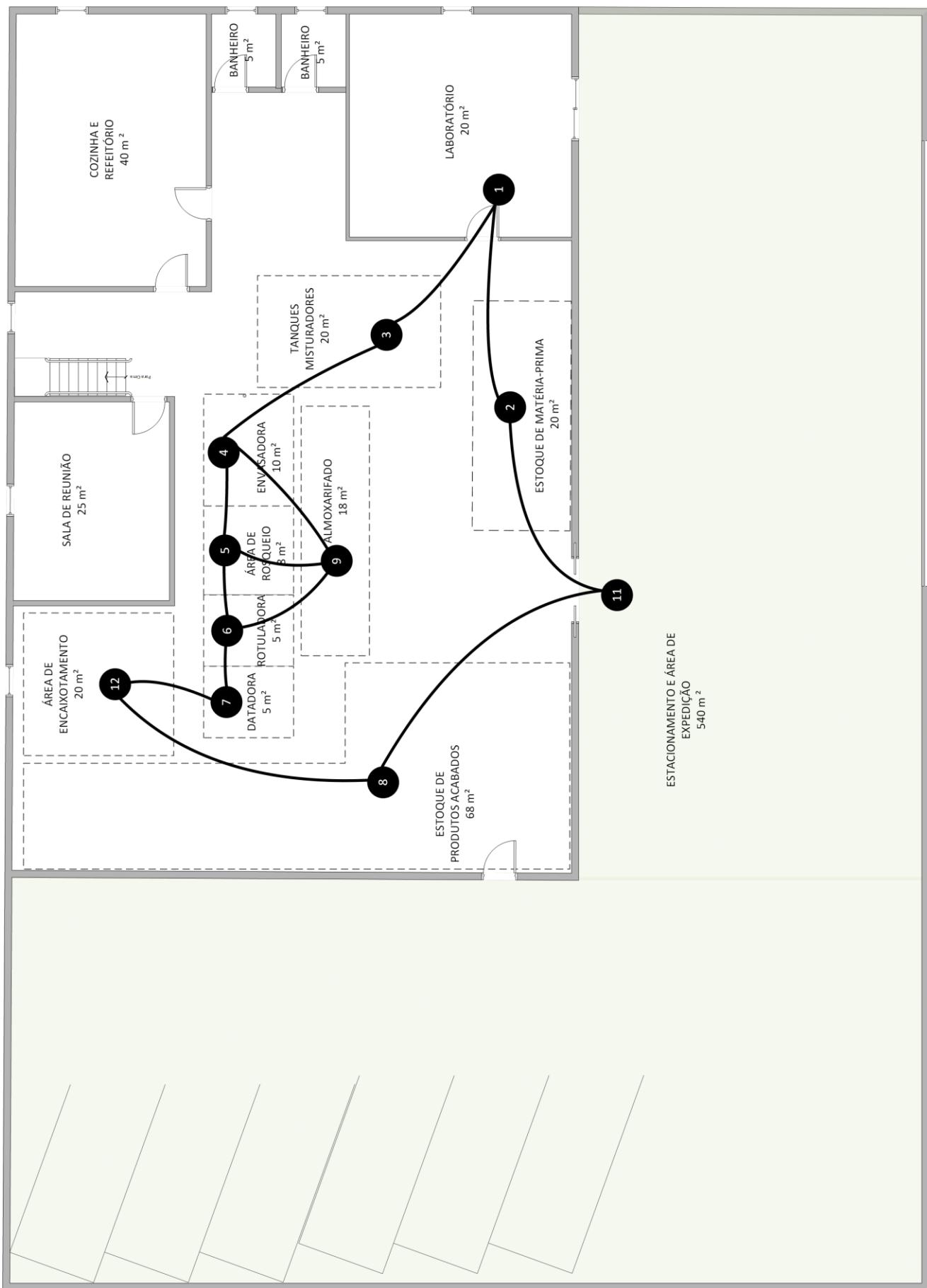
SILVA JÚNIOR, O. C.; MIRANDA JÚNIOR, G.; CONCEIÇÃO, S. V. **Reconfiguração dinâmica de linhas de montagem**. Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, v.30, n.1, p.237-258, 2010.

SIPPER, D.; BULFIN JR., R.L. **Production: planning, control and integration**. Nova York: McGraw-Hill, 1997.

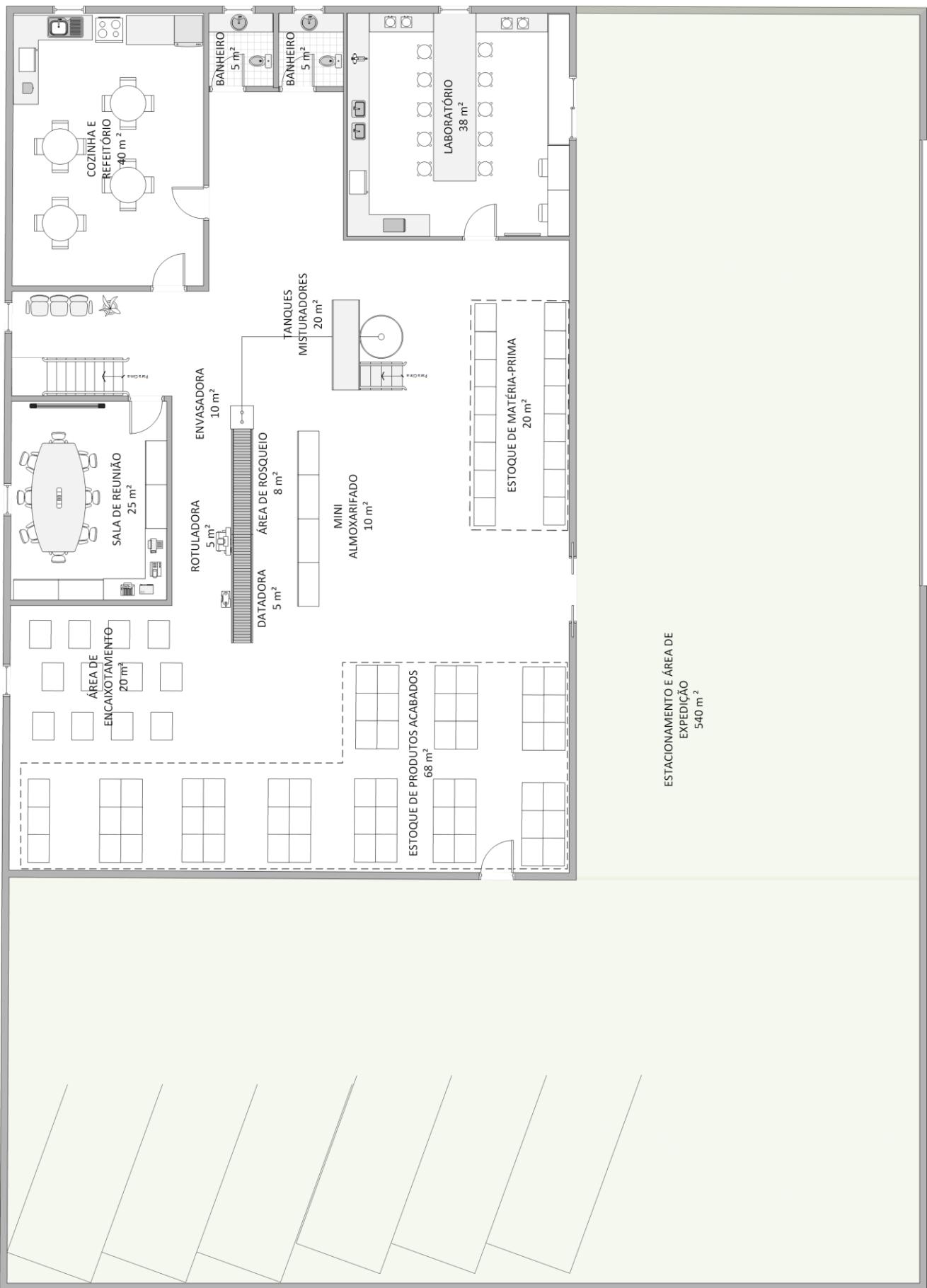
TUBINO, DALVIO F. **Manual de Planejamento e Controle da Produção**. São Paulo: Atlas, 1997.

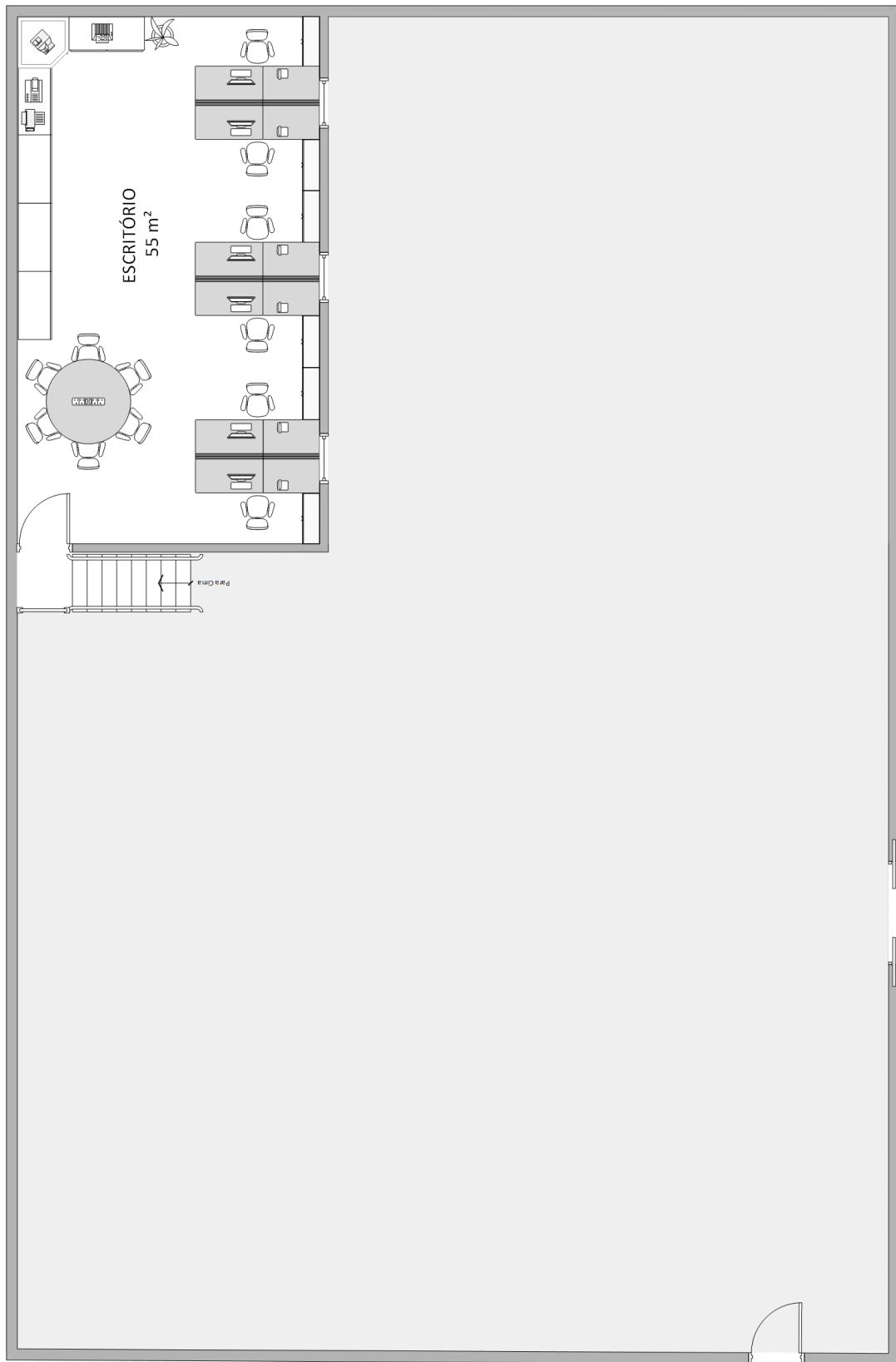
TURATTO, R. **Estudo de melhorias do layout produtivo no processo de fabricação de equipamentos para indústria de bebidas**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. Disponível em:
http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/241_Artigo%20Rafael%20Turatt o.doc.

ANEXO 1 – MAPOFUXOGRAMA



ANEXO 2 – PLANTA BAIXA LAYOUT FABRIL



ANEXO 3 – PLANTA BAIXA LAYOUT MEZANINO

ANEXO 4 – PLANTA BAIXA LAYOUT ADAPTADO PARA EXPANSÕES

