

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS  
NÍVEL MESTRADO

LUCAS SCHMIDT GOECKS

PLANEJAMENTO DE LEIAUTES PARA EMPRESAS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE  
Uma análise a partir do *Systematic Layout Planning* e *Particle Swarm Optimization*

SÃO LEOPOLDO  
2018

Lucas Schmidt Goecks

PLANEJAMENTO DE LEIAUTES PARA EMPRESAS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE  
Uma análise a partir do *Systematic Layout Planning* e *Particle Swarm Optimization*

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do grau de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Produção e Sistemas da Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos — UNISINOS

Orientador:  
Prof. Dr. André Luis Korzenowski

São Leopoldo  
2018

G593p

Goecks, Lucas Schmidt

Planejamento de leiautes para empresas de pequeno e médio porte: uma análise a partir do *systematic layout planning* e *particle swarm optimization* / Lucas Schmidt Goecks — 2018.

141 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, São Leopoldo, 2018.

“Orientador: Prof. Dr. André Luis Korzenowski.”

1. Planejamento de Leiaute. 2. Planejamento Sistêmico de Leiaute. 3. Otimização por Nuvem de Partículas. 4. Empresas de pequeno e médio porte. I. Título.

CDU 658.511

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)

(Silvana Teresinha Dornelles Studzinski — CRB 10/2524)

(Esta folha serve somente para guardar o lugar da verdadeira folha de aprovação, que é obtida após a defesa do trabalho. Este item é obrigatório, exceto no caso de TCCs.)

Dedico este trabalho a todos que se fizeram presente ao longo desta caminhada e que, na medida do possível, auxiliaram no desenvolvimento do mesmo.

## AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos,

A Deus, por tudo.

Aos meus pais, Nerí R. G. Goecks e Ilica J. Schmidt Goecks, pela força e apoio incondicional, por me incentivarem na busca de grandes objetivos e de nunca sonhar pequeno.

A minha noiva, Débora L. Kurz, por entender os meus momentos de distanciamento e pela inspiração à docência.

Aos demais familiares e amigos que me apoiaram na escolha desse caminho.

Ao meu orientador, prof. Dr. André L. Korzenowski, pela paciência e ensinamentos transmitidos ao longo desses dois anos; como ele mesmo define, o Lucas antes e pós Mestrado.

Ao Leonardo D. Chiwiacowsky por estar sempre disposto a me ajudar com problemas de programação.

Aos meus colegas e professores do PPGEPS.

À secretaria do PPGEPS.

Obrigado!

## RESUMO

Como uma das atividades mais importantes na engenharia de produção, o planejamento de instalações consiste na tomada de decisões relativas ao leiaute dos setores, unidades de produção/fabricação, locais de armazenamento, e assim por diante. Conceito que é apoiado pela variabilidade dos processos produtivos, que muda de um período de produção para outro e de uma empresa para a outra. Atualmente, a literatura apresenta abordagens de como solucionar o problema de leiaute para empresas de pequeno e médio porte com modelos de planejamento, e de tomada de decisão multicritérios, ou meta-heurísticos. A literatura aborda estes dois métodos de forma separada. Inclusive, não existem relatos de comparações entre eles desde o conhecimento do autor. Como resposta à esta lacuna de pesquisa, definiu-se o seguinte objetivo: "identificar um método para planejamento de leiautes aplicável em empresas de pequeno e médio porte". A meta foi desenvolver uma ferramenta de modelagem genérica e que atenda à diferentes necessidades. Sendo assim, este trabalho abordou o *Systematic Layout Planning* (SLP) e o *Particle Swarm Optimization* (PSO) para o planejamento de leiautes, avaliando a melhor proposta pelo *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Em decorrência de interesses práticos que visam à aplicação de ferramentas para a solução de problemas específicos, este trabalho classifica-se como pesquisa aplicada de abordagem quantitativa, embasado por processos de tomada de decisão e de modelagem. Os resultados obtidos demonstram que o SLP fornece melhores propostas de leiautes que o PSO, para pequenas e médias empresas. O SLP respeita a alocação adjacente dos setores de acordo com o fluxo de material, enquanto que o PSO distribui aleatoriamente as áreas produtivas, o que proporciona maior variabilidade nas propostas de leiautes. O SLP demandou maior tempo de planejamento e um método auxiliar (AHP) para definição da melhor proposta de leiaute. Já o PSO forneceu o melhor leiaute sem uma ferramenta de suporte e a simulação foi mais rápida após estruturação do modelo do algoritmo. Implicações práticas à esta pesquisa encontram-se na análise da redução de custos com dados reais. Foram identificados na literatura objetivos de otimização e restrições mais usuais. Quanto ao tipo de leiaute, conforme as características da empresa a ser explorada, será considerado o tipo *job-shop*/funcional. Esta pesquisa contribui ao meio acadêmico no âmbito de sintetizar dois métodos, distintos, para planejamento de leiautes e compará-los com uma ferramenta de tomada de decisão multicriterial. Ao meio empresarial, a mesma fornece métodos que podem ser incorporados ao cotidiano das empresas no que diz respeito ao planejamento de leiautes e tomada de decisões.

**Palavras-chave:** Planejamento de Leiaute. Planejamento Sistemico de Leiaute. Otimização por Nuvem de Partículas. Empresas de pequeno e médio porte.

## ABSTRACT

As one of the most important activities in production engineering, facility planning consists of making decisions regarding the layout of the sectors, production/manufacturing units, storage locations, and so on. This concept is supported by the variability of production processes, which changes from one period of production to another and from one company to another. Currently, the literature presents approaches of how to solve the problem of layout for small and medium-sized companies with models of planning, and decision-making multi-criteria, or meta-heuristics. The literature addresses these two methods separately. In fact, there are no reports of comparisons between them since the knowledge of the author. In response to this research gap, the following objective was defined: "to identify a method for layout planning applicable to small and medium-sized enterprises". The objective was to develop a generic modeling tool that meets different needs. Thus, this work approached Systematic Layout Planning (SLP) and Particle Swarm Optimization (PSO) for the layout planning, evaluating the best proposal by the Analytic Hierarchy Process (AHP). Because of practical interests that aim at the application of tools for the solution of specific problems, this work is classified as applied research of quantitative approach, based on processes of decision-making and modeling. The results obtained demonstrate that SLP provides better layout proposals than the PSO, for small and medium enterprises. The SLP respects the adjacent allocation of the sectors according to the material flow, while the PSO randomly distributes the productive areas, which provides greater variability in the layout proposals. The SLP required greater planning time and an auxiliary method (AHP) to define the best layout proposal. The PSO provided the best layout without a support tool and the simulation was faster after structuring the algorithm model. Practical implications of this research lie in the analysis of cost reduction with real data. Optimization objectives and constraints that are more usual have been identified in the literature. As for the type of layout, according to the characteristics of the company, and because it is a single case study, the job-shop type will be considered. This research contributes to the academic environment in the context of synthesizing two distinct methods for planning layouts and comparing them with a multi-criteria decision-making tool. In the business environment, it provides methods that can be incorporated into companies' day-to-day planning and decision making.

**Keywords:** Layout Planning. Systematic Layout Planning. Particle Swarm Optimization. Small and Medium Enterprises.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Diagrama de relacionamento de atividades . . . . .	29
Figura 2:	Estrutura do Planejamento Sistêmico de Leiaute . . . . .	31
Figura 3:	Processo de planejamento do leiaute . . . . .	43
Figura 4:	Diagrama de relação de atividades . . . . .	49
Figura 5:	Leiaute 1 - SLP . . . . .	51
Figura 6:	Leiaute 2 - SLP . . . . .	52
Figura 7:	Leiaute 3 - SLP . . . . .	53
Figura 8:	Leiaute 4 - SLP . . . . .	54
Figura 9:	Leiaute 5 - SLP . . . . .	55
Figura 10:	Leiaute 1 - PSO . . . . .	59
Figura 11:	Leiaute 2 - PSO . . . . .	59
Figura 12:	Leiaute 3 - PSO . . . . .	60
Figura 13:	Leiaute 4 - PSO . . . . .	60
Figura 14:	Leiaute 5 - PSO . . . . .	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Escala fundamental dos números absolutos . . . . .	35
Tabela 2:	Fluxo de materiais . . . . .	46
Tabela 3:	Dimensões dos setores . . . . .	47
Tabela 4:	Guia para o diagrama de relação de atividades . . . . .	48
Tabela 5:	Distância (m) entre centroides - SLP . . . . .	62
Tabela 6:	Distância (m) entre centroides - PSO . . . . .	63
Tabela 7:	Escala de importância (Saaty) referente a empresa em análise . . . . .	64
Tabela 8:	Comparações por pares entre os atributos/critérios - Empresa . . . . .	64
Tabela 9:	Comparações por pares, critério: atendimento às normas de SSMA e BPF - Empresa . . . . .	65
Tabela 10:	Comparações por pares, critério: minimizar o manuseio de materiais - Empresa	65
Tabela 11:	Comparações por pares, critério: minimizar a distância entre setores - Empresa	65
Tabela 12:	Comparações por pares, critério: redução da área fabril - Empresa . . . . .	65
Tabela 13:	Ordenação das melhores propostas de leiaute - Empresa . . . . .	66
Tabela 14:	Escala de importância (Saaty) referente aos objetivos da literatura para FLP .	67
Tabela 15:	Comparações por pares entre os atributos/critérios - Literatura FLP . . . . .	67
Tabela 16:	Comparações por pares, critério: minimizar distância entre setores - Litera- tura FLP . . . . .	67
Tabela 17:	Comparações por pares, critério: minimizar custo de manuseio de materiais - Literatura FLP . . . . .	68
Tabela 18:	Comparações por pares, critério: minimizar o custo de rearranjo - Literatura FLP . . . . .	68
Tabela 19:	Comparações por pares, critério: minimizar o custo do espaço - Literatura FLP	68
Tabela 20:	Comparações por pares, critério: minimizar o fluxo de material - Literatura FLP . . . . .	68
Tabela 21:	Ordenação das melhores propostas de leiaute - Literatura . . . . .	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1:	Objetivos e restrições no planejamento de leiautes . . . . .	22
Quadro 2:	<i>Analytic Hierarchy Process</i> para planejamento de cenários . . . . .	25
Quadro 3:	Meta-heurísticas utilizadas nos últimos 5 anos para planejamento de leiaute .	26
Quadro 4:	Código de relacionamento de atividades . . . . .	30
Quadro 5:	Etapas da dissertação . . . . .	41
Quadro 6:	Quadro de relação de atividades . . . . .	49

## LISTA DE SIGLAS

ACO	Ant Colony Optimization
ACO-GLS	Ant Colony Optimization - Guided Local Search
AGV	Automated Guided Vehicle
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
ARAS-F	Fuzzy Ratio Assessment
Bi Objective MILP	Bi Objective Mixed Integer Linear Programming
BRKGA	Biased Random-Key Genetic Algorithm
Closed Loop LP	Closed Loop Layout Problem
CPSO-LP	Combinatorial Particle Swarm Optimization and Linear Programming
CSA	Clonal Selection Algorithm
CSLP	Construction Site Layout Planning
DDRLP	Dynamic Double-row Layout Problem
DEA	Data Envelopment Analysis
DFLP	Dynamic Facility Layout Problem
DPLP	Dynamic Plant Layout Problem
FBS	Flexible Bay Systems
FDM	Fuzzy Delphi Method
FLP	Facility Layout Problem
GA	Genetic Algorithm
HMPGA	Hybrid Multi-Population Genetic Algorithm
HS	Heuristic Search
Hybrid GA	Hybrid Genetic Algorithm
Hybrid Fuzzy-GA	Hybrid Fuzzy - Genetic Algorithm
ICFWAP	Integrated Cell Formation and Worker Assignment Problem
IGA	Improved Genetic Algorithm
IMALP	Integrated Machine Allocation and Layout Problem
ISA	Improved Simulated Annealing
Loop LP	Loop Layout Problem
LP	Linear Programming
MBO	Migrating Birds Optimization
MIP	Mixed Integer Programming
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimization

MRFLP	Multi-row Facility Layout Problem
Multi-Floor FL	Multi-Floor Facility Layout Problem
NADL	Net Aisle and Department Layout
OTL	Operating Theater Layout
PABC	Permutation-based Artificial Bee Colony
PO	Pesquisa Operacional
PSO	Particle Swarm Optimization
SA	Simulated Annealing
SLP	Systematic Layout Planning
SLPP	Site Layout Planning Problem
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TS	Tabu Search
UA - FLP	Unequal Area - Facility Layout Problem
UMFDLP	Uncertain Multi-Floor Discrete Layout Problem
QAP - FLP	Quadratic Assignment Problem - Facility Layout Problem

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Apresentação do Tema e Problema de Pesquisa	14
1.2	Objetivos	16
1.3	Justificativa	16
1.3.1	Justificativa Acadêmica	16
1.3.2	Justificativa Econômica/Empresarial	17
1.4	Delimitações	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>19</b>
2.1	Leiaute	19
2.2	Tipos de leiaute	20
2.3	Planejamento de Leiaute	24
2.3.1	Estudos correlatos	25
2.4	<i>Systematic Layout Planning</i>	28
2.5	Ferramenta para tomada de decisão	30
2.5.1	Analytic Hierarchy Process	31
2.6	Métodos de otimização	36
2.6.1	Particle Swarm Optimization	36
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>40</b>
3.1	Etapas da pesquisa	41
3.2	Ferramentas computacionais	44
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>45</b>
4.1	Coleta de dados	46
4.2	Planejamento das propostas de leiaute	47
4.2.1	<i>Systematic Leiaute Planning</i>	47
4.2.2	<i>Particle Swarm Optimization</i>	56
4.3	Análise das propostas de leiautes	62
4.4	Seleção do leiaute pelo <i>Analytic Hierarchy Process</i>	63
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>70</b>
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXO A ARTIGOS DESENVOLVIDOS	79

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação do Tema e Problema de Pesquisa

O planejamento de leiaute envolve o arranjo de uma determinada quantidade de instalações, onde o custo total para mover o material durante o processo produtivo seja minimizado (LIU et al., 2018; KULTUREL-KONAK, 2017; XIAO et al., 2017; SAFARZADEH; KOOSHA, 2017; KANG; CHAE, 2017; PAES; PESSOA; VIDAL, 2017; CHE; ZHANG; FENG, 2017; PAPADAKI; CHASSIAKOS, 2016; IZADINIA; ESHGHI, 2016; WANG et al., 2015; ULUTAS; ISLIER, 2015; NIROOMAND et al., 2015; POURVAZIRI; NADERI, 2014; NASAB, 2014; MOHAN; PILLAI, 2013; MANITA; KORBAA, 2013; GARCÍA-HERNÁNDEZ et al., 2013; HERAGU; KUSIAK, 1991). Além do manuseio de materiais, o planejamento de leiautes envolve a redução de estoques em processo, o *lead time*, o uso do espaço existente de forma mais eficaz, procura tornar a planta adaptável às mudanças futuras, e proporciona um ambiente saudável, conveniente e seguro para os funcionários (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017). Por consequência, este também considera a redução de custo relacionada ao espaço total disponível (LIU et al., 2018; XIAO et al., 2017; PAPADAKI; CHASSIAKOS, 2016; WANG et al., 2015; GARCÍA-HERNÁNDEZ et al., 2013). Desta maneira, garante-se o aumento da produtividade pela determinação de um arranjo eficiente das instalações dentro da organização (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017), sendo este um problema de otimização encontrado em muitas organizações de manufatura e serviços (MELLER; NARAYANAN; VANCE, 1998). Em termos de complexidade computacional, o planejamento de leiaute é categorizado como um problema da classe *NP-Hard* (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017; DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007; BLAND, 1999).

O leiaute de instalações deve respeitar todas as restrições de projeto, ou seja, os limites do local e suas capacidades, para que assim possa ser considerado viável (HAMMAD; REY; AKBARNEZHAD, 2017; CHRAIBI et al., 2016; GONÇALVES; RESENDE, 2015). Tortorella e Fogliatto (2008) mencionam que a importância da distribuição física de um processo é reforçada pelas consequências a longo prazo das decisões e do custo de se projetar novamente a planta fabril. Neste sentido, alguns estudos desenvolvidos em fábricas procuraram minimizar as necessidades de replanejamento de leiaute (KULTUREL-KONAK, 2017; XIAO et al., 2017; PAPADAKI; CHASSIAKOS, 2016; ULUTAS; ISLIER, 2015; POURVAZIRI; NADERI, 2014; GARCÍA-HERNÁNDEZ et al., 2013).

A saída de um projeto de leiaute de instalação é uma estrutura de blocos, que especifica a localização relativa de cada departamento/setor, permitindo, assim, realizar mais trabalhos para obter o leiaute detalhado, que especifica locais exatos de cada departamento/setor, corredores e pontos de entrada e saída de materiais (MELLER; GAU, 1996). Como métodos para solução deste, Besbes et al. (2017); Al-Hawari, Mumani e Momani (2014); Cambron e Evans (1991) dão um destaque para as ferramentas multicritérios de tomada de decisão. Por outro

lado, Liu et al. (2016); Ojaghi et al. (2015) utilizam o *Systematic Layout Planning* para planejamento das propostas de leiautes. Outro método para planejamento encontra-se nas pesquisas de García-Hernández et al. (2013); Jia e Seo (2013); Manita e Korbaa (2013); Mohan e Pillai (2013); Nasab (2014); Pourvaziri e Naderi (2014); Gonçalves e Resende (2015); Niroomand et al. (2015); Ulutas e Islier (2015); Wang et al. (2015); Barth (2016); Chraibi et al. (2016); Hafiz e Abdennour (2016); Izadinia e Eshghi (2016); Papadaki e Chassiakos (2016); Paes, Pessoa e Vidal (2017); Che, Zhang e Feng (2017); Hammad, Rey e Akbarnezhad (2017); Kang e Chae (2017); Safarzadeh e Koosha (2017); Xiao et al. (2017); Kulturel-Konak (2017); Feng et al. (2017); Liu et al. (2018), onde são apresentados vários algoritmos meta-heurísticos utilizados nos últimos cinco anos para a solução do *facility layout problem* (FLP). Kusiak e Heragu (1987) destacam que os algoritmos heurísticos que solucionam o problema de leiaute devem: (i) produzir soluções de boa qualidade; (ii) ter exigência computacional muito baixa, isto é, baixa memória e tempo de computação; (iii) ser capaz de resolver problemas com instalações de áreas iguais e desiguais, proporcionando flexibilidade ao usuário em relação à configuração das instalações; ou seja, fornecem bons resultados para solução de problemas de planejamento de leiaute.

Desta maneira, a literatura apresenta abordagens de como solucionar o problema de leiaute pelos métodos SLP (menor complexidade), em conjunto com as ferramentas para tomada de decisão, ou técnicas meta-heurísticas (maior complexidade), porém de forma separada. Tortorella e Fogliatto (2008) destacam esta lacuna de pesquisa e sugerem o uso de algoritmos para múltiplos critérios no planejamento de leiaute, tal como uma comparação com o método proposto no artigo. Jiang e Nee (2013) complementam que o uso de algoritmos de otimização auxiliam os usuários na tomada de decisões, ou seja, na seleção da melhor proposta. As pesquisas envolvendo o planejamento de leiaute podem se concentrar em modelos mais realistas de otimização e tratar de problemas com um número maior de restrições (melhorando a confiabilidade da resposta), sendo necessária a aplicação em múltiplos casos para validação do método proposto (EROĞLU; SEÇKINER, 2012; KULTUREL-KONAK; KONAK, 2011; HANI et al., 2007). Em complemento, Drira, Pierreval e Hajri-Gabouj (2007) apontam que quando se trata de situações com vários objetivos, autores sugerem a aplicação do método AHP e de ferramentas da computação para otimização e generalização do planejamento de leiaute. Sendo assim, o intuito deste trabalho é estruturar e comparar dois métodos aplicáveis em distintos processos produtivos, que permitam a entrada de dados com características, produtos e volumes diferentes. Desta maneira, desenvolvendo uma ferramenta de modelagem genérica e que atenda a diferentes necessidades. Seguindo esta lacuna, fica exposta a seguinte questão de pesquisa: qual método de modelagem utilizar para o planejamento de leiautes em indústrias de pequeno e médio porte?

Para validação do modelo proposto e comparação entre os métodos de planejamento de leiautes para empresas de pequeno e médio porte, esta pesquisa utilizou dados reais coletados de uma empresa. A empresa a ser explorada está situada no município de Santa Cruz do Sul, região central do Rio Grande do Sul, em uma área de aproximadamente três mil metros

quadrados. Onde já passou por várias reformulações desde a sua criação, incluindo o replanejamento do seu leiaute por inúmeras vezes, conforme o crescimento desta. Os setores que hoje a compõem, foram planejados pela experiência fabril de funcionários que estavam diretamente ligados com o processo produtivo, ou seja, gestores que iniciaram no “chão de fábrica”. O procedimento de planejamento levava em consideração os espaços disponíveis para a inserção de novas máquinas. A planta era planejada sem o auxílio de ferramentas gerenciais, utilizando apenas a experiência e o conhecimento que possuíam do processo. O que acarretou em diversas construções que separam o prédio em partes. Por consequência, estas ampliações impactaram na descentralização de alguns setores.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é identificar um método para planejamento de leiautes aplicável em empresas de pequeno e médio porte. Para tanto, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Identificar as estratégias de planejamento de leiaute utilizadas em trabalhos aplicados da literatura;
- Escolher entre os modelos identificados aqueles que apresentam melhores condições de atuar em empresas de pequeno e médio porte; e
- Avaliar os resultados da aplicação das ferramentas por meio de um modelo de análise de decisão multicriterial.

## 1.3 Justificativa

### 1.3.1 Justificativa Acadêmica

Estudos referentes ao planejamento de leiautes se concentram em apresentar uma ferramenta para planejamento e compará-la com resultados de outras pesquisas. Mas são escassos os relatos, conforme pesquisas nas principais bases de dados, da aplicação de dois métodos distintos para o planejamento de leiautes, que utilizem os mesmos objetivos. A comparação deste dois métodos justifica-se pela aplicação de duas ferramentas distintas, uma de planejamento manual e a outra por meio de algoritmos.

Para o planejamento de leiautes envolvendo métodos menos complexos, porém manuais, tem-se a adoção do *Systematic Layout Planning* (SLP) (FAHAD et al., 2017; LIU et al., 2016; OJAGHI et al., 2015). Onde Ojaghi et al. (2015) utilizam este método em empresas de pequeno e médio porte, similar ao porte de empresa proposto por este trabalho. Já Fahad et al. (2017); Liu et al. (2016) aplicam o SLP para a gestão de energia e instalação de um sistema de alarmes em uma planta de energia nuclear, respectivamente. Estas duas aplicações demonstram a versatilidade do método SLP. E como método de tomada de decisão, tem-se a adoção do *Analytic*

*Hierarchy Process* (AHP) devido ao seu histórico de aplicação em conjunto com o SLP. Desta maneira, faz-se possível a aplicação do AHP como ferramenta de tomada de decisão para o SLP.

Como métodos de otimização, nas pesquisas desenvolvidas por Safarzadeh e Koosha (2017); Ulutas e Islier (2015), onde os autores aplicam algoritmos genéticos e *simulated annealing*, estes sugerem que o pesquisador examine outras meta-heurísticas para possíveis melhorias das soluções de leiaute geradas por eles. Sendo assim, Hafiz e Abdennour (2016) sugerem a aplicação do *Particle Swarm Optimization* (PSO) com heurísticas de melhoramento. Inclusive, um algoritmo PSO que necessite de um número menor parâmetros (POURVAZIRI; NADERI, 2014). Desta maneira o algoritmo proposto pelo autor deve apresentar uma estruturação de modelos mais realísticos (IZADINIA; ESHGHI, 2016).

De acordo com o teorema "sem almoço grátis (*No Free Lunch - NFL*)", não há um único algoritmo de otimização para resolver todos os problemas com eficiência e eficácia. Diferentes algoritmos possuem diferentes capacidades para resolver diferentes tipos de problemas de otimização. É difícil prever o melhor algoritmo para cada problema de otimização. No entanto, o conjunto de diferentes algoritmos de otimização pode ser uma solução potencial e mais eficiente do que usar um único algoritmo para resolver problemas complexos (LYNN; SUGANTHAN, 2017). Por este motivo justifica-se a inserção de uma heurística de melhoramento na meta-heurística original.

### 1.3.2 Justificativa Econômica/Empresarial

O planejamento de leiaute envolve a disposição física de um determinado número de instalações retangulares dentro de uma determinada configuração. O objetivo é minimizar o custo total associado às interações entre as instalações. No contexto da fabricação, esse custo corresponde ao custo total de manuseio de materiais entre departamentos ou máquinas (NOURELFATH; NAHAS; MONTREUIL, 2007).

A principal características dos processos produtivos atuais é a variabilidade, que muda de um período de produção para outro (BAYKASOGLU; DERELI; SABUNCU, 2006). O planejamento de leiaute tem por objetivo encontrar a melhor configuração para alocação de máquinas e pessoas, otimizando o fluxo e reduzindo custos de movimentação interna (HANI et al., 2007). Este conceito é apoiado por Kulturel-Konak e Konak (2011), que determinam o planejamento de leiaute da seguinte maneira: é dado um número  $n$  de setores, de área conhecida, distribuídos em um espaço  $w \times h$ , onde as restrições de cada setor devem atender o planejamento geral (KULTUREL-KONAK; KONAK, 2011). Após selecionar a localização da fábrica e antes de implementar esquemas operacionais, Hadi-Vencheh e Mohamadghasemi (2013) destacam que o dever mais importante dos gerentes, engenheiros e planejadores é observar as metas e estratégias da empresa, e avaliar os critérios mais importantes que influenciam no planejamento de leiaute. O planejamento da instalação pode incluir de 10-30% do custo operacional devido a mudanças futuras (HADI-VENCHEH; MOHAMADGHASEMI, 2013).

Vale ressaltar que o custo do manuseio de materiais representa de 20% a 50% do total de despesas operacionais em ambientes de fabricação (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017; SINGH; YILMA, 2013; DE CARLO et al., 2013; HUANG et al., 2010; DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007; JOSEPH, 2006; TOMPKINS et al., 1996; FRANCIS; MCGINNIS; WHITE, 1992). Onde custo de movimentação do material está diretamente ligado com a distância entre setores, podendo este ser melhorado através de um planejamento eficaz de leiaute (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017; JOSEPH, 2006). Esses custos poderiam ser reduzidos de 10% a 30% ao ano com um planejamento eficiente das instalações (SINGH; YILMA, 2013; DE CARLO et al., 2013). Sob este ponto de vista, o trabalho contribui no sentido de entregar um modelo para otimizar a instalação de novas plantas produtivas, a fim de proporcionar a redução das perdas associadas a movimentações, facilitando a supervisão de pessoas e distribuição de máquinas e equipamentos.

Devido à relevância prática do apoio à decisão de múltiplos critérios, e aos desafios da modelagem do pensamento humano, contribuindo para a tomada transparente de decisões (GELDERMANN; SCHÖBEL, 2011). Razmak e Aouni (2015) acreditam que a implementação de um sistema de apoio a decisão multicritério (*Multi-Criteria Decision Support System*) aumentará o desempenho da gerência no processo de tomada de decisões. Desta maneira, esta pesquisa contribui para o setor empresarial apresentando o sequenciamento de uma ferramenta de gestão/planejamento com outra de tomada de decisão para a seleção da proposta de leiaute. Bem como com dois métodos para o planejamento de leiautes com um número reduzido de setores.

#### 1.4 Delimitações

A análise da redução de custos com dados reais não será utilizada nesta pesquisa, pois estes números são de propriedade da empresa em análise e, na maioria dos casos, não são divulgados para agentes externos. Sendo assim, será utilizada a distância percorrida pelo material para que reflita o custo no manuseio de materiais. Por tanto, o método de comparação entre as propostas se dará pela minimização desta distância.

Os objetivos, quanto ao planejamento de leiautes, que serão abordados nesta pesquisa serão os seguintes: (i) minimizar as distâncias entre máquinas e setores, (ii) minimizar o custo de manuseio de materiais e (iii) e minimizar o custo de rearranjo de leiaute. E as restrições: (i) de área, espaçamento entre corredores e tamanho da fábrica; e, (ii) de posicionamento, localização das entradas/saídas dos setores. Sendo assim, estas características serão consideradas nos métodos propostos por esta pesquisa. Quanto ao tipo de leiaute, conforme as características da empresa a ser explorada, será considerado o tipo *job-shop*/funcional, onde o processo produtivo da mesma é composto por setores que possuem máquinas com características similares.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nos atuais ambientes de fabricação, a volatilidade é o que determina as metas comerciais (CHEN, 2013). Sob um ambiente volátil, a demanda não é estável. Ela muda de um período de produção para outro. Para operar de forma eficiente em tais ambientes, as instalações devem ser adaptáveis aos requisitos de produção (BAYKASOGLU; DERELI; SABUNCU, 2006).

### 2.1 Leiaute

Como uma das atividades mais importantes na engenharia de produção, o planejamento de instalações consiste na tomada de decisões relativas ao leiaute dos setores, unidades de produção/fabricação, locais de armazenamento, e assim por diante (HAMZHEEI; FARAHANI; RASHIDI-BAJGAN, 2013). O leiaute de uma instalação é o arranjo de tudo o que é necessário para a produção de bens ou a entrega de serviços. Uma instalação é uma entidade que facilita o desempenho de qualquer trabalho. Pode ser uma máquina-ferramenta, um centro de trabalho, uma célula de fabricação, uma oficina de máquinas, um departamento, um armazém, etc. (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007).

O problema de leiaute de instalação (*Facility Layout Problem* - FLP) é a distribuição de um determinado número de facilidades de tamanho não igual dentro de um determinado espaço, encontrando o arranjo mais eficiente de uma planta (máquinas e equipamentos) (ALLAHYARI; AZAB, 2017; DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007; HANI et al., 2007; HERAGU; KUSIAK, 1991). A colocação das instalações na área da planta é conhecida por ter um significativo impacto sobre os custos no planejamento de leiaute (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007; HANI et al., 2007). O planejamento de leiaute busca reduzir o custo no manuseio de materiais (KULTUREL-KONAK; KONAK, 2011), o trabalho em processo e o *lead time*, a utilização mais eficaz do espaço existente, tornar a planta adaptável às mudanças futuras, proporcionar um ambiente saudável, conveniente e seguro para os funcionários e aumentar a produtividade mediante a determinação de um arranjo eficiente (leiaute) das instalações necessárias dentro da organização (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017). Tradicionalmente, as pesquisas sobre o planejamento de leiaute tratam dos departamentos/setores, áreas e fluxos (CHEN, 2013).

Um bom plano de leiaute leva em consideração a melhor utilização das máquinas, a qualidade dos equipamentos, a eficiência do *setup*, um menor estoque de materiais e o custo de movimentação (ALLAHYARI; AZAB, 2017). Vale ressaltar que o custo do manuseio de materiais representa de 20% a 50% das despesas operacionais totais em ambientes de fabricação (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017; HAMZHEEI; FARAHANI; RASHIDI-BAJGAN, 2013). Já Allahyari e Azab (2017) destacam que, de um modo geral, o planejamento eficiente do leiaute oferece duas vantagens principais: (1) Redução entre 30% e 70% no custo total de manuseio de materiais e (2) projeto de longo prazo, pois evita despesas, como encerrar a produ-

ção, perdas de tempo de processo e assim por diante. O custo do manuseio de materiais depende principalmente da quantidade do fluxo de materiais e das distâncias entre setores (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017).

Na sua forma mais geral, o problema de leiaute de instalação, no plano contínuo, é definido da seguinte forma: de acordo com o fluxo de produção, um número de setores  $N$  é fornecido com determinados requisitos/critérios e sua área interdepartamental de materiais e máquinas é definida por um tamanho  $W \times H$  com o intuito de minimizar a custo total de manuseio de material que, em geral, é expresso pela Equação (2.1)

$$z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N c_{ij} f_{ij} d_{ij} \quad (2.1)$$

onde  $d_{ij}$  é a distância especificada entre os setores  $i$  e  $j$ ,  $f_{ij}$  é a quantidade do fluxo de material e  $c_{ij}$  é o custo para manuseio de material por unidade de fluxo por unidade de distância percorrida entre os setores  $i$  e  $j$ . As restrições do problema incluem satisfazer os requisitos de área dos setores e os limites do leiaute. Além disso, as restrições sobre as formas dos setores podem ser aplicadas por causa de preocupações práticas. A saída do FLP, que é chamado de leiaute de blocos, especifica os locais relativos e as formas dos setores na área total da planta. No *design* da instalação, os corredores, os pontos de entrada e saída dos setores e o leiaute detalhado dentro de cada setor também são planejados. Portanto, um leiaute de blocos não deve minimizar apenas o custo de manuseio de material, mas também ser facilmente transferível para o leiaute de instalações atual relacionado (KULTUREL-KONAK; KONAK, 2011).

## 2.2 Tipos de leiaute

Os problemas de leiaute podem ser considerados como estáticos ou dinâmicos, onde os itens necessários à produção permanecerão, ou não, constantes durante um longo período de tempo (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007). O planejamento do leiaute de instalações é um problema de otimização que, geralmente, trata do arranjo físico das instalações produtivas em uma organização (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017). De acordo com Allahyari e Azab (2017), existem duas abordagens quanto ao planejamento de leiautes, (1) discreta e (2) contínua, ou seja, de distribuição quadrática (*Quadratic Assignment Problem - QAP*) ou assimétrica dos setores. Existem dois principais pressupostos no QAP: em primeiro lugar, todas as facilidades são de tamanho e forma iguais; em segundo lugar, a localização das instalações é conhecida a priori. No entanto, esses tipos de premissas não são aplicáveis em estudos de casos do mundo real. Enquanto que, na abordagem contínua, existem duas maneiras de resolver estes problemas. Cronologicamente, a primeira tentativa consiste em dividir cada instalação em blocos de unidades de menor tamanho, onde a área total desses blocos é aproximadamente igual à área da instalação. Já a segunda abordagem ao problema contínuo, pressupõe a forma e as dimensões

exatas das instalações (ALLAHYARI; AZAB, 2017; DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007). Ou, onde os dados que afetam os problemas de leiaute não são exatamente conhecidos, sugere-se o uso da formulação difusa (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007). Quanto ao tamanho do leiaute, para distinguir se é de grande escala ou não, Bland (1999) cita que se uma empresa possui um número de setores superior a quinze, este será considerado de larga escala.

A escolha da melhor configuração de leiaute da instalação é claramente uma decisão a ser feita durante a fase inicial do projeto, mesmo que possa ser modificada durante uma fase de redesenho devido a, por exemplo, uma extensão da planta. Devido as diferentes propriedades de um processo de fabricação - principalmente, a capacidade produtiva e a variedade de produtos - as estações de trabalho devem ser organizadas e planejadas adequadamente. De Carlo et al. (2013) apresenta uma estrutura esquemática em sua pesquisa e destaca a presença de quatro tipos de leiaute, posição fixa, *job-shop*, celular e fluxo. Esta define-se:

1. Posição fixa: é usado para a manufatura de produtos muito grandes, como navios, aviões e máquinas pesadas (DE CARLO et al., 2013; SLACK N.; JOHNSTON, 2013). Os recursos transformados não se movem entre os recursos transformadores. Equipamentos, maquinários, instalações e pessoas se movem de acordo com a necessidade do produto. A eficácia de um arranjo físico posicional está ligada à acessibilidade ao produto e à confiabilidade das entregas (SLACK N.; JOHNSTON, 2013).
2. *Job-shop*/Funcional: onde a produção é dividida em diferentes setores, cada um dos quais é especializado em uma determinada tecnologia (DE CARLO et al., 2013). As necessidades dos recursos transformadores dominam a decisão sobre o arranjo físico. Processos similares são alocados próximos um do outro. Os produtos percorrerão um roteiro de processo a processo de acordo com a sua necessidade, portanto, percorrerão diferentes roteiros na operação. A densidade do fluxo é uma informação importante para planejar este tipo de leiaute (SLACK N.; JOHNSTON, 2013).
3. Celular: este é caracterizado por células (nomeadamente, grupos de diferentes estações de trabalho) e utilizado para produzir produtos similares de poucas famílias diferentes. É adequado quando o volume de produção não suporta a escolha pela produção em massa (DE CARLO et al., 2013). Os recursos transformados, entrando na operação, são pré-selecionados para movimentar-se para uma parte específica da operação/célula, atendendo as necessidades imediatas de processamento. A célula pode ser organizada seguindo um arranjo físico por processo ou por produto (SLACK N.; JOHNSTON, 2013).
4. Fluxo/Linha/Produto: este é utilizado para a produção de grandes quantidades de um produto específico através de uma série de estações de trabalho conectadas (DE CARLO et al., 2013). A alocação dos recursos transformadores é efetuada de acordo com o produto a ser transformado e a sequência de atividades para a transformação deste. Neste tipo de leiaute, o fluxo de informações e produtos é muito claro e fácil de controlar (SLACK N.; JOHNSTON, 2013).

A classificação apresentada por De Carlo et al. (2013), é apenas o passo inicial na identificação das possíveis configurações de leiaute de instalação, para um determinado plano de fabricação. O desenvolvimento da melhor e mais adequada configuração de leiaute, na verdade, geralmente é feito com alguma técnica específica em que muitos outros parâmetros são considerados, como as relações entre as diferentes estações de trabalho, problemas em sua proximidade, etc. Normalmente, autores trabalham com determinados objetivos e restrições para o planejamento de leiautes. O Quadro 1 representa um síntese das principais características adotadas nos últimos cinco anos.

**Quadro 1:** Objetivos e restrições no planejamento de leiautes

<i>Autor</i>	<i>Tipo de leiaute</i>	<i>Objetivos</i>					<i>Restrições</i>		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
García-Hernández et al. (2013)	UA - FLP		x	x	x				x
Jia e Seo (2013)	FLP	x							x
Manita e Korbaa (2013)	Loop LP	x	x				x	x	
Mohan e Pillai (2013)	DPLP + NADL		x						x
Nasab (2014)	IMALP		x						x
Pourvaziri e Naderi (2014)	DFLP		x	x				x	
Gonçalves e Resende (2015)	UA - FLP	x					x		
Niroomand et al. (2015)	Closed Loop LP		x					x	
Ulutas e Islier (2015)	DFLP		x	x				x	
Wang et al. (2015)	DDRLP	x				x		x	
Chraibi et al. (2016)	OTL		x				x		
Hafiz e Abdennour (2016)	QAP - FLP					x		x	
Izadinia e Eshghi (2016)	UMFDLP		x					x	
Papadaki e Chassiakos (2016)	CSLP		x	x	x				x
Paes, Pessoa e Vidal (2017)	UA - FLP	x	x				x	x	
Che, Zhang e Feng (2017)	Multi-Floor FLP	x	x				x	x	
Hammad, Rey e Akbarnezhad (2017)	SLPP		x					x	
Kang e Chae (2017)	UA - FLP		x				x		
Safarzadeh e Koosha (2017)	MRFLP		x	x			x	x	
Xiao et al. (2017)	DFLP		x	x	x		x		
Kulturel-Konak (2017)	DFLP		x	x				x	
Feng et al. (2017)	ICFWAP	x						x	
Liu et al. (2018)	UA-FLP	x	x		x		x	x	x
<b>23 artigos de 2013 à 2018</b>	<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>18</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>6</b>

Objetivos: a. Minimizar a distância entre máquinas/setores; b. Minimizar o custo de manuseio de materiais; c. Minimizar o custo de rearranjo; d. Minimizar o custo do espaço; e. Minimizar o fluxo de material. Restrições: f. área; g. posição; h. custo.

De acordo com Drira, Pierreval e Hajri-Gabouj (2007), vários tipos de leiautes são abordados na literatura. Na verdade, os problemas de leiaute abordados dependem fortemente das características específicas dos sistemas de fabricação. Vários fatores diferenciam a natureza dos problemas a serem abordados, em particular: a variedade e o volume de produção, o sistema de manuseio de materiais, os diferentes fluxos possíveis permitidos para as peças, o número de

pisos nos quais as máquinas podem ser distribuídas, as formas das instalações e os locais de recebimento e entrega. Em complementos aos tipos de leiautes apresentados por Drira, Pierreval e Hajri-Gabouj (2007), Heragu e Kusiak (1991) identificaram quatro padrões básicos de leiaute de máquinas, sendo eles: linha única circular, linha única linear, duas linhas lineares e várias linhas. Estes definem-se como:

1. Variedade e volume de produtos: O design do leiaute geralmente depende da variedade e do volume dos produtos. Quatro tipos básicos de organização são referidos em artigos e bibliografias existentes, sendo elas, por produto, celular, por processo e fixo. No leiaute fixo ou posicional, o produto não se move, são os diferentes recursos (máquinas, trabalhadores, etc.) que são movidos para executar as operações no produto. Este tipo de leiaute é comumente encontrado em indústrias que fabricam produtos de grande porte, como navios ou aeronaves. O leiaute por processo organiza as instalações de acordo com que as funções similares (recursos do mesmo tipo) fiquem em conjunto. Esta organização é frequentemente relatada como adequada quando há uma grande variedade de produtos. No leiaute celular, as máquinas são agrupadas em células, para processar famílias de peças semelhantes. E o leiaute por produto é usado para sistemas com altos volumes de produção e uma baixa variedade de produtos. As instalações são organizadas de acordo com a sequência das sucessivas operações de fabricação (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007).
2. Forma e dimensão das instalações: Duas formas diferentes de setores são muitas vezes distinguidas: regular, ou seja, geralmente retangulares, e irregulares, ou seja, geralmente polígonos contendo pelo menos um ângulo de  $270^\circ$ . Uma instalação pode ter dimensões definidas por um comprimento ( $L_i$ ) e uma largura fixos ( $W_i$ ), nesse caso, as instalações são chamadas de blocos fixos ou rígidos (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007).
3. Sistemas de manuseio de materiais: Entre os principais tipos de leiaute com base no tipo de movimentação de materiais, pode-se distinguir: leiaute de linha única, leiaute de linhas múltiplas, leiaute de *loop* e leiaute de campo aberto. O problema de leiaute de linha única ocorre quando as instalações devem ser colocadas ao longo de uma linha. Várias formas podem ser consideradas a partir desta situação básica, como linha reta, semicircular ou U. O leiaute de várias linhas envolve várias linhas de instalações. Os movimentos de peças ocorrem entre instalações da mesma linha e de linhas diferentes. O problema de leiaute de *loop* é entendido como uma atribuição de instalações em uma rede de anel fechada, em torno das partes que são transportadas em uma direção. O leiaute de *loop* incorpora uma estação *Load/Unload* (L/U), ou seja, local a partir do qual uma parte entra e sai do *loop*. O leiaute do campo aberto corresponde a situações em que as instalações podem ser alocadas sem regras ou com restrições induzidas pelos arranjos de linha única ou *loop* (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007).
4. Leiaute de vários andares: Quando se trata de construir uma fábrica em área urbana, a

área de terra disponível geralmente é insuficiente e cara. A limitação do espaço horizontal disponível cria a necessidade de usar uma dimensão vertical. Então, pode ser relevante localizar as instalações em vários andares. O movimento vertical das peças requer um dispositivo de transporte vertical (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007).

5. *Backtracking* e *bypassing*: *Backtracking* e *bypassing* são dois movimentos que podem ocorrer em leiautes em linha, que afetam o fluxo dos produtos. *Backtracking* é o movimento de uma peça, de uma instalação para outra que a precede na sequência das instalações no arranjo em linha. O número desses movimentos deve ser minimizado. O *bypass* ocorre quando uma parte ignora algumas instalações durante a sua mudança no arranjo em linha. Vários procedimentos foram apresentados para lidar e minimizar o *backtrack*, mas nenhum procedimento foi sugerido na literatura para abordar o *bypass* (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007).
6. Locais de *pick-up* e *drop-off*: Muitas vezes, é necessário determinar a localização onde as peças entram e saem dos setores, chamados pontos de pontos de recolhimento e saída. Embora pudessem estar localizados em vários locais, vários pesquisadores restringiram sua possível posição para reduzir a complexidade no planejamento (DRIRA; PIERREVAL; HAJRI-GABOUJ, 2007).

Para resumir as características do planejamento de leiaute, Drira, Pierreval e Hajri-Gabouj (2007) reúnem todos estes estudos em sua pesquisa que revisa a literatura sobre FLP. Os autores apresentam os sistemas de manufatura, ou seja, os quatro tipos de leiaute, fixo, por processo, por produto e celular, onde a forma de instalação destes pode ser regular (proporcional) ou irregular. O sistema de movimentação do material dependerá da configuração do leiaute, sendo em linha única/múltiplas, de *loop*, a céu aberto ou com vários andares. E sua movimentação ao longo do fluxo pode ser por dispositivos e com/sem retrocesso. Quanto ao objetivo de planejar o leiaute, tem-se por meta minimizar, custos com espaços, movimentações e replanejamentos, retrocesso/desvio, congestionamento de tráfego e irregularidades de forma, onde as restrições estão relacionadas com a área (do espaço alocado e a localização das instalações), com o posicionamento (folga entre as instalações, orientação, pontos de coleta/entrega e sem sobreposição) e com as despesas envolvidas.

### 2.3 Planejamento de Leiaute

Para o planejamento de leiaute, envolvendo métodos menos complexos, tem-se a adoção do *Systematic Layout Planning* (SLP) (FAHAD et al., 2017; LIU et al., 2016; OJAGHI et al., 2015). Ojaghi et al. (2015) utilizam este método em empresas de pequeno e médio porte, porém o mesmo é sustentado por várias ferramentas de apoio ao planejamento e decisão. Já Fahad et al. (2017); Liu et al. (2016) utilizam o SLP para a gestão de energia e instalação de um sistema de alarmes em uma planta de energia nuclear, respectivamente. E como método de tomada de decisão (Quadro 2), tem-se a adoção do *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para a seleção das

propostas de leiautes ou planejamento de sistemas de ventilação, urbanismo, aeroportos, portos e instalações de linhas de trens (BESBES et al., 2017; BERSANI et al., 2015; KURSUNOGLU; ONDER, 2015; LAI et al., 2015; ZAVADSKAS; TURSKIS; BAGOČIUS, 2015; AL-HAWARI; MUMANI; MOMANI, 2014; WEY; HSU, 2014). Desta maneira, faz-se possível a união destes dois métodos para o planejamento de leiautes, o AHP como ferramenta de tomada de decisão para o SLP.

**Quadro 2:** *Analytic Hierarchy Process* para planejamento de cenários

<i>Autor</i>	<i>Ano</i>	<i>Método</i>	<i>Critérios comuns</i>					
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Al-Hawari, Mumani e Momani (2014)	2014	ANP	x	x	x		x	x
Bersani et al. (2015)	2015	AHP		x				
Besbes et al. (2017)	2017	AHP & TOPSIS		x	x	x	x	x
Kursunoglu e Onder (2015)	2015	AHP	x			x		
Lai et al. (2015)	2015	AHP & DEA		x	x			
Wey e Hsu (2014)	2014	FDM & AHP	x	x			x	
Zavadskas, Turskis e Bagočius (2015)	2015	AHP & ARAS-F		x		x		

Principais critérios: a. flexibilidade; b. acessibilidade; c. expansão; d. minimizar custo; e. proximidade; f. fatores humanos.

Em contrapartida, para a solução do *facility layout problem* (FLP), existem métodos que envolvem uma estruturação complexa (Quadro 3), mais robusta, (LIU et al., 2018; PAES; PESSOA; VIDAL, 2017; CHE; ZHANG; FENG, 2017; HAMMAD; REY; AKBARNEZHAD, 2017; KANG; CHAE, 2017; SAFARZADEH; KOOSHA, 2017; XIAO et al., 2017; KULTUREL-KONAK, 2017; FENG et al., 2017; BARTH, 2016; CHRAIBI et al., 2016; HAFIZ; ABDENNOUR, 2016; IZADINIA; ESHGHI, 2016; PAPADAKI; CHASSIAKOS, 2016; WANG et al., 2015; ULUTAS; ISLIER, 2015; NIROOMAND et al., 2015; GONÇALVES; RESENDE, 2015; POURVAZIRI; NADERI, 2014; NASAB, 2014; MOHAN; PILLAI, 2013; MANITA; KORBAA, 2013; JIA; SEO, 2013; GARCÍA-HERNÁNDEZ et al., 2013). Estes métodos são empregados em empresas de pequeno, médio e grande porte. Apesar deste conceito empírico apresentar maior complexidade para ser inserido nos métodos tradicionais, Feng et al. (2017) sugerem a incorporação de características/decisões humanas como pesquisas futuras.

### 2.3.1 Estudos correlatos

Pelas meta-heurísticas, tem-se o *Particle Swarm Optimization* (PSO) como método para planejamento de leiautes. Autores como Chraibi et al. (2016); Hafiz e Abdennour (2016); Feng et al. (2017); Liu et al. (2018), aplicaram este método para o desenvolvimento do FLP. O problema de *Operating Theater Layout* (OTL) multi-objetivo, apresentado por Chraibi et al. (2016), consistia na alocação de determinadas áreas em um diferentes seções de um departamento de sala cirúrgica. O problema OTL procurava encontrar um leiaute de instalações em um departamento hospitalar em conformidade com os padrões internacionais de credenciamento de

**Quadro 3:** Meta-heurísticas utilizadas nos últimos 5 anos para planejamento de leiaute

<i>Autor</i>	<i>Método</i>	<i>Tipo de leiaute</i>
García-Hernández et al. (2013)	IGA	UA - FLP
Jia e Seo (2013)	PABC	FLP
Manita e Korbaa (2013)	Hybrid GA	Loop LP
Mohan e Pillai (2013)	SA + LP	DPLP + NADL
Nasab (2014)	Hybrid Fuzzy-GA	IMALP
Pourvaziri e Naderi (2014)	HMPGA	DFLP
Gonçalves e Resende (2015)	BRKGA	UA - FLP
Niroomand et al. (2015)	MBO	Closed Loop LP
Ulutas e Islier (2015)	CSA	DFLP
Wang et al. (2015)	ISA	DDRLP
Chraibi et al. (2016)	PSO	OTL
Hafiz e Abdennour (2016)	PSO	QAP - FLP
Izadinia e Eshghi (2016)	MIP + ACO	UMFDLP
Papadaki e Chassiakos (2016)	GA	CSLP
Paes, Pessoa e Vidal (2017)	GA	UA - FLP
Che, Zhang e Feng (2017)	Bi-objective MILP	Multi-Floor FLP
Hammad, Rey e Akbarnezhad (2017)	MIP	SLPP
Kang e Chae (2017)	HS	UA - FLP
Safarzadeh e Koosha (2017)	GA	MRFLP
Xiao et al. (2017)	MILP	DFLP
Kulturel-Konak (2017)	TS	DFLP
Feng et al. (2017)	CPSO-LP	ICFWAP
Liu et al. (2018)	MOPSO	UA-FLP

assistência médica. Os principais objetivos foram, minimizar os custos totais de viagem entre instalações e maximizar as adjacências entre eles. O artigo apresentou uma formulação matemática para determinar o OTL ótimo pelo PSO. Já Hafiz e Abdennour (2016), estudaram um problema de atribuição quadrática (QAP). Eles destacaram que o PSO provou ser muito eficaz em várias aplicações, e que recebeu pouca atenção nessa frente. Neste artigo, uma nova abordagem baseada em probabilidade foi proposta para o PSO. O estudo realizado pelos autores revelou que a técnica proposta é efetiva, sugerindo o desenvolvimento de um novo algoritmo PSO. Por sua vez, Feng et al. (2017) pesquisaram sobre a manufatura celular, envolvendo o *design* das células e questões humanas como fatores importantes para sua implementação. Desenvolveram um modelo linear para determinar a alocação ideal de máquinas, peças e trabalhadores. As características específicas desse modelo incluíram o planejamento de produção, a coexistência de roteiros de processos alternativos, divisão de lote, balanceamento de carga de trabalho entre células e atribuição de trabalho a várias células. Este artigo propôs uma abordagem híbrida combinando otimização da nuvem de partículas e programação linear (CPSO-LP) para resolver eficientemente problemas reais. Por fim, o FLP foi considerado por Liu et al. (2018) para instalações de áreas desiguais (UA-FLP). Os objetivos deste problema visavam otimizar o custo de manuseio de material, a adjacência dos setores e maximizar a utilização do chão-de-fábrica. Neste artigo, os autores apresentaram uma hibridização do PSO com uma heurística de busca local. Para garantir a não sobreposição dos setores, o algoritmo PSO provou sua alta eficácia e robustez na solução de problemas multi-objetivos. Os resultados mostraram que o método proposto foi eficaz na resolução do UA-FLP multi-objetivo.

Para o planejamento de leiautes pelo *Ant Colony Optimization*, tem-se estudos desenvolvidos por Hamzheei, Farahani e Rashidi-Bajgan (2013); Eroğlu e Seçkiner (2012); Kulturel-Konak e Konak (2011); Hani et al. (2007); Baykasoglu, Dereli e Sabuncu (2006). Hamzheei, Farahani e Rashidi-Bajgan (2013) investigaram o problema de projeto de caminho mais curto em leiautes de blocos que utilizam AGV's (*Automated Guided Vehicles*). Um modelo de programação linear foi desenvolvido para resolver esse problema. O modelo pretendia minimizar o comprimento do caminho do AGV por todas as células. Porém este modelo só é capaz de resolver problemas com um pequeno número de células. Então, utilizaram um algoritmo do sistema de colônia de formigas para sua resolução. Já Eroğlu e Seçkiner (2012) apresentaram um algoritmo de colônia de formigas para maximizar a produção de energia eólica, pela distribuição de oito turbinas, evitando o efeito *wake loss*; conseqüentemente, maximizando a geração de energia. Os autores sugeriram que as pesquisas com meta-heurísticas devem se concentrar em modelos mais realísticos de otimização, enquanto que Kulturel-Konak e Konak (2011) apresentam uma abordagem de otimização para resolver o problema de leiaute de instalações com setores de áreas desiguais e flexíveis (*Flexible Bay Systems - FBS*). Da mesma maneira, Hani et al. (2007) desenvolveram um método para planejamento do leiaute de instalações, porém desta vez se tratava de uma empresa de manutenções de trens. Os autores apresentaram a ACO-GLS, uma abordagem híbrida de otimização pelas colônias de formigas associada a uma

pesquisa local guiada. Os resultados obtidos pelos autores mostraram uma melhoria de cerca de 20% em relação ao leiaute atual do caso em análise. Por fim, Baykasoglu, Dereli e Sabuncu (2006) estenderam a aplicação do ACO para planejamento de leiautes dinâmicos que possuíssem, ou não, restrições de orçamento. Esta pesquisa foi a primeira tentativa em demonstrar como o ACO pode ser aplicado ao DLP com restrições orçamentárias.

Quanto aos métodos heurísticos clássicos, Allahyari e Azab (2017); Alvarenga, Negreiros-Gomes et al. (2000) planejaram o leiaute celular de manufatura com o recozimento simulado (*simulated annealing* - SA). No estudo desenvolvido por Allahyari e Azab (2017), o problema de leiaute de instalação (FLP) incluía o leiaute inter e intracelular. Um modelo contínuo de programação não-linear/contínua mista de dois níveis foi formulado para definir o problema e a relação entre *design* de leiaute intra e intercelular. As instalações assumidas eram de tamanho desigual. Sequências de operação, demanda de peças, eliminação de sobreposição e corredores foram considerados no projeto. Deste modo, foi projetado e implementado uma meta-heurística de recozimento simulado que emprega uma nova heurística construtiva de base radial para inicialização do algoritmo. Pela primeira vez, um novo algoritmo heurístico foi projetado para alocar e deslocar instalações em direção radial. Para validar o modelo, os autores utilizaram um estudo de caso real na indústria de corte de metal. Os resultados demonstraram a superioridade do algoritmo SA desenvolvido em relação a outras meta-heurísticas encontradas na literatura levantada por eles. Já que na pesquisa desenvolvida por Alvarenga, Negreiros-Gomes et al. (2000), os autores trataram de um problema de leiaute de instalações nos sistemas de fabricação. Através da natureza combinatória do problema, os autores propuseram uma abordagem híbrida, baseada no SA e na Busca Tabu (*Tabu Search*). Os resultados computacionais mostraram que o procedimento utilizado por eles parece ser uma boa alternativa para tratar do planejamento de leiaute de instalações.

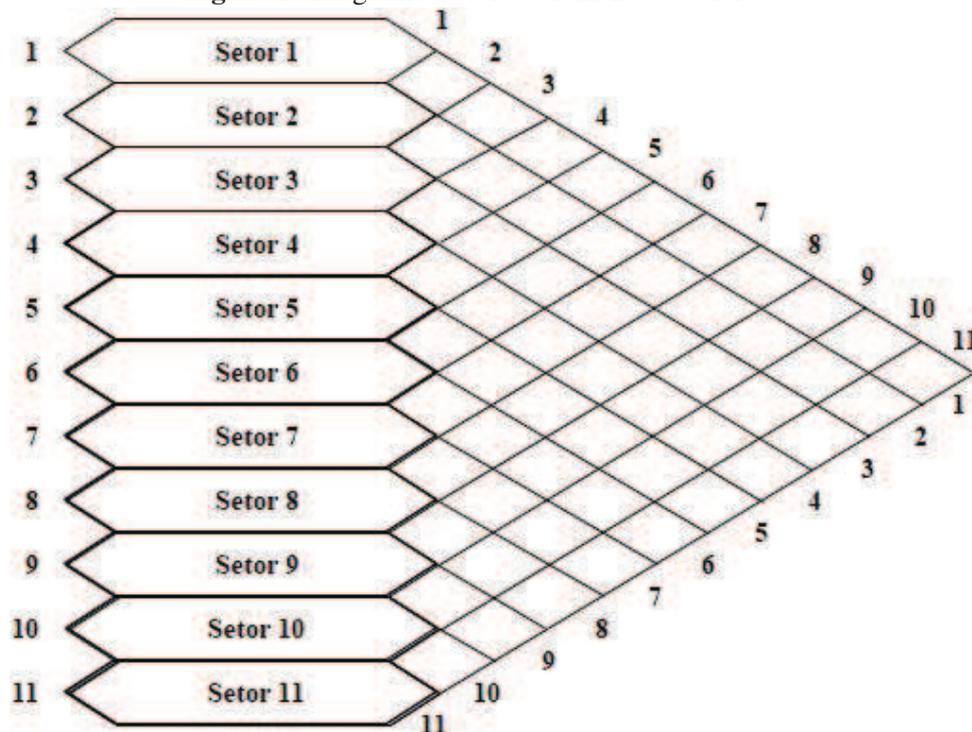
## 2.4 *Systematic Layout Planning*

De acordo com De Carlo et al. (2013), o *Systematic Layout Planning* (SLP) (em português, Planejamento Sistemático de Leiaute) foi desenvolvido em 1973 por Richard Muther, e é um dos métodos mais utilizados na concepção ou redesenho de um leiaute de instalações e inclui três fases específicas. Singh e Yilma (2013) destacam que as três áreas fundamentais desta técnica são: relações (dados de entrada, fluxo de materiais, relações de atividade e diagrama de relacionamento), espaço (requisitos de espaço, espaço disponível e diagrama de relacionamento espacial) e ajuste (restrições de modificação, limitações práticas, desenvolvimento do leiaute e avaliação). De maneira sucinta, De Carlo et al. (2013) resumem estes conceitos da seguinte maneira:

- Coleta e análise de dados;
- Pesquisa entre as possíveis soluções de leiaute;
- Avaliação das alternativas e escolha do melhor leiaute.

A etapa de coleta e análise dos dados inicia com a avaliação do fluxo de materiais, onde todos os dados são apresentados de acordo com o fluxo de produção e com a quantidade de material enviado de um setor para o outro. As atividades são analisadas por pares, com o objetivo de definir o grau de proximidade entre elas. O diagrama de relacionamento (Figura 1) é quem exerce essa função, definindo, assim, quais devem estar próximos. A proximidade ou adjacência das atividades deve ser planejada de acordo com as disponibilidades de espaço da empresa. Na etapa de pesquisa entre as possíveis soluções de leiaute, se obtém um arranjo ideal dos setores. Na sequência, trabalha-se com um arranjo realístico, apresentando uma mínima variação com relação ao ideal. Após o desenvolvimento do leiaute, inicia-se a etapa de avaliação das alternativas e escolha da melhor proposta, efetuando uma avaliação de viabilidade e aprovação entre os setores envolvidos. Atendendo os critérios do projeto e permitindo que os usuários-chave e as pessoas que vão aprovar o leiaute participem das decisões (TORTORELLA; FOGLIATTO, 2008; MUTHER, 1973).

**Figura 1:** Diagrama de relacionamento de atividades



Fonte: Elaborado pelo autor

O SLP combina a análise da relação logística entre setores com a busca do leiaute ideal, que se encaixa não só nas diferentes escalas e tipos de plantas quando recém construídas, expandidas e reconstruídas, mas também para outras organizações, como escritórios, laboratórios, armazéns, hospitais e lojas, etc. Hui e Shi-you (2013) salientam este conceito e complementam estas fases do sistema SLP:

- Analisar a relação entre as unidades de trabalho, incluindo os 5 fatores, ou seja, P (produtos e materiais), Q (quantidade), R (rota de produção), S (setores suporte) e T (tempo)

(TORTORELLA; FOGLIATTO, 2008; MUTHER, 1973).

- Sintetizar para desenhar o gráfico de relacionamento das unidades trabalho.
- Alocar nas posições as unidades de trabalho.
- Integrar as posições das unidades de trabalho com áreas de chão de fábrica.
- Ao revisar e ajustar, obter várias propostas viáveis de leiaute.
- Avaliar as propostas para obter a melhor.

A saída do primeiro passo de SLP é o gráfico de relacionamento, ou "*buff diagram*". Ele deriva de informações como o fluxo de materiais entre as diferentes estações de trabalho, seus requisitos de adjacência e os motivos correspondentes. Em um gráfico de relacionamento, podemos ver as diferentes operações e um código de letra específico - no lado direito - com ou sem um número, correspondente a cada par de departamento. Cada código de letra representa uma classe específica de adjacência, Quadro 4. Alternativamente, o número está relacionado ao motivo pelo qual o código de relacionamento é nomeado, em termos de segurança, facilidade de supervisão, etc. (DE CARLO et al., 2013; MUTHER, 1973).

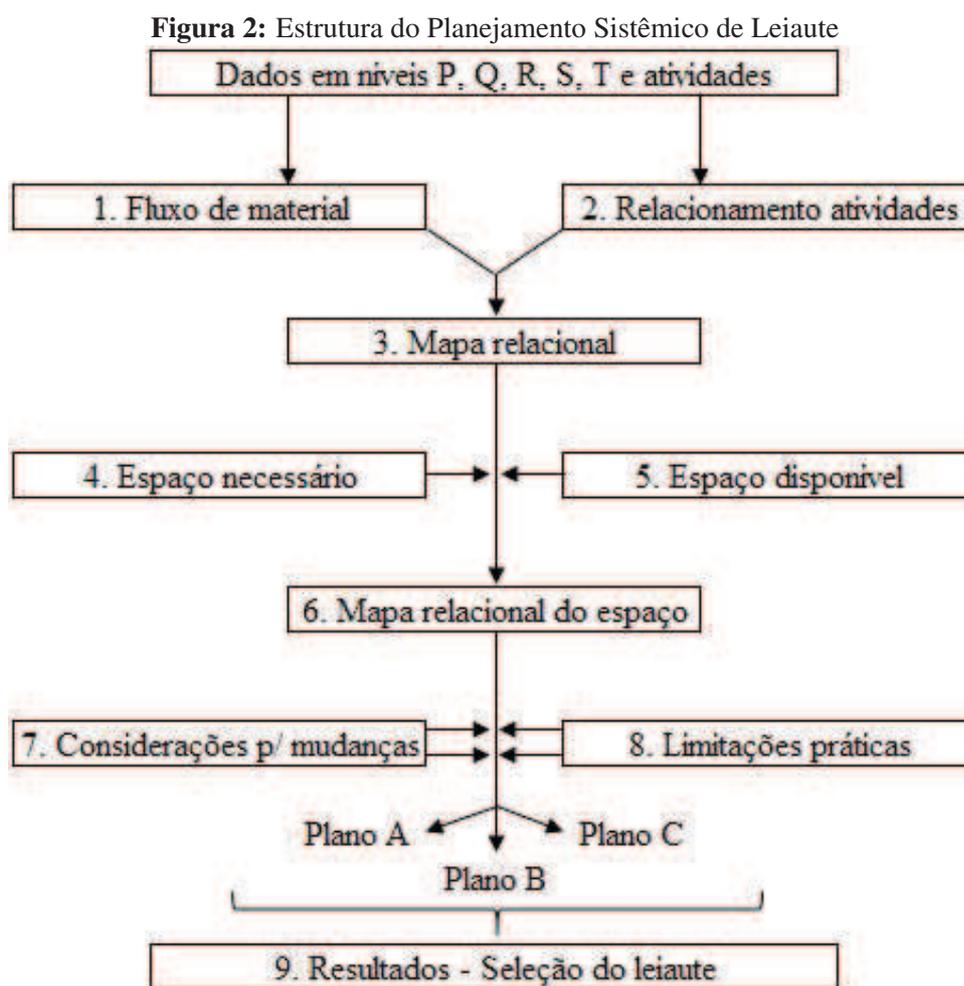
**Quadro 4:** Código de relacionamento de atividades

Código	Legenda
A	Absolutamente importante
E	Essencialmente importante
I	Importante
O	Pouco importante
U	Sem importância
X	Indesejável

O próximo passo é a construção do diagrama de relacionamento (Figura 1). Este representa as atividades do gráfico de relacionamento e é conectado por linhas. O número de linhas que ligam duas atividades deriva do nível de proximidade desejada: quatro linhas para a classe A de adjacência, três para a classe E, e assim por diante. O diagrama de relacionamento permite a consideração de configurações alternativas de leiaute. Entre elas, será encontrada a melhor solução, escolhida considerando mais do que apenas fatores de economia, como a melhoria do fluxo de materiais, a redução de resíduos, etc. (DE CARLO et al., 2013; MUTHER, 1973). Desta maneira, estes conceitos podem ser esquematizados pela estrutura apresentada na Figura 2.

## 2.5 Ferramenta para tomada de decisão

A tomada de decisões envolve muitos critérios e subcritérios utilizados para classificar as alternativas de uma decisão. Não só é necessário criar prioridades para as alternativas, em relação aos critérios ou subcritérios que precisam ser avaliados, mas também para os critérios, em termos de um objetivo maior, ou se eles dependerem das alternativas, então em termos das próprias alternativas. Os critérios podem ser intangíveis, sem medidas para servir como



Fonte: Adaptado de Wiyaratn e Watanapa (2010)

um guia para classificar as alternativas, criando prioridades para os próprios critérios, sendo uma tarefa desafiadora para a classificação das alternativas. A medida de fatores intangíveis nas decisões tem sido por muito tempo desafiadora ao entendimento humano. O número e a medição são o núcleo da matemática e esta é essencial para a ciência. Até hoje, a matemática assumiu que todas as coisas podem ser relacionadas a números de menos a mais infinito, e toda modelagem matemática da realidade foi descrita dessa maneira, usando os eixos e a geometria. Naturalmente, tudo isso se baseia no pressuposto de fatores essenciais, onde todos esses fatores são mensuráveis. Mas há muitos fatores mais importantes que não sabemos como medir do que os que temos para medições. Saber como medir esses fatores poderia levar a novas e importantes teorias que dependem de muitos outros fatores para suas explicações (SAATY, 2008).

### 2.5.1 Analytic Hierarchy Process

O uso do *Analytic Hierarchy Process* (AHP) na resolução de um problema de decisão envolve quatro etapas. Porém Tortorella e Fogliatto (2008) dão destaque à três etapas básicas. Mas, seguindo os conceitos de Saaty (2008), para tomar uma decisão de forma organizada (ge-

rando prioridades), precisamos decompor a decisão em quatro etapas:

1. Defina o problema e determine o tipo de conhecimento procurado;
2. Estruture a hierarquia de decisão colocando no topo o objetivo da decisão. Então, os objetivos de uma perspectiva mais ampla, através dos níveis intermediários (critérios nos quais os elementos subsequentes são dependentes) para o nível mais baixo (que geralmente é um conjunto de alternativas);
3. Construa um conjunto de matrizes de comparação por pares. Cada elemento em um nível superior é usado para comparar os elementos no nível imediatamente abaixo em relação a ele;
4. Use as prioridades obtidas das comparações para ponderar as prioridades no nível imediatamente abaixo. Faça isso para cada elemento. Então, para cada elemento no nível abaixo, adicione seus valores ponderados e obtenha sua prioridade global. Continue este processo de pesagem e adição até que as prioridades finais das alternativas no nível mais inferior sejam obtidas.

Na etapa 2, que talvez seja o aspecto mais importante do AHP, o analista de decisão deve dividir o problema de decisão em uma hierarquia de elementos de decisão inter-relacionados. No topo da hierarquia reside o objetivo da decisão, como o objetivo de tomar a melhor decisão (ou selecionar a melhor alternativa). Os níveis mais baixos da hierarquia contêm atributos (objetivos) que contribuem para avaliar a qualidade da decisão. Os detalhes desses atributos aumentam no nível mais baixo da hierarquia. O último nível da hierarquia contêm alternativas de decisão ou opções de seleção. O número de níveis depende da complexidade do problema e do grau de detalhamento do problema, uma vez que cada nível implica comparações por pares de seus elementos (ZAHEDI, 1986).

Na etapa 3, os dados de entrada para o problema consistem em matrizes de comparações por pares que contribuem para alcançar/satisfazer os objetivos do próximo nível mais alto. Quando comparados a si mesmo, cada elemento tem igual importância. Já os elementos triangulares inferiores da matriz, são os elementos do triângulo superior recíproco. Assim, os dados de comparação em pares são colhidos para apenas metade dos elementos da matriz, excluindo elementos diagonais (ZAHEDI, 1986).

Na etapa 4, a técnica de solução do AHP toma como entrada as comparações parciais acima e produz, em cada nível, os pesos relativos dos elementos. O argumento para a metodologia de solução é o seguinte: se o avaliador pudesse conhecer os pesos relativos reais de  $n$  elementos (a um nível da hierarquia em relação a um nível maior), a matriz das comparações em pares seria, Equação (2.2).

$$A = \begin{bmatrix} n_1/n_1 & n_1/n_2 & \dots & n_1/n_n \\ n_2/n_1 & n_2/n_2 & \dots & n_2/n_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_n/n_1 & n_n/n_2 & \dots & n_n/n_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Em outras palavras, a matriz  $A$  possui o grau 1; e a seguinte é a Equação (2.3).

$$A \cdot W = n \cdot W \quad (2.3)$$

onde  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  é o vetor de pesos relativos reais, e  $n$  é o número de elementos. Na álgebra,  $n$  e  $W$ , na Equação (2.3), são chamados de autovalor (*eigenvalue*) e autovetor (*eigenvector*) da matriz  $A$  (ZAHEDI, 1986).

O AHP postula que o avaliador não conhece o  $W$  e, portanto, não é capaz de produzir com precisão os pesos relativos por pares da matriz  $A$ . Assim, a matriz  $A$  contém inconsistências. A determinação de  $W$  (denotada como  $\hat{W}$ ) pode ser obtida com a Equação (2.4).

$$\hat{A} \cdot \hat{W} = \lambda_{max} \cdot \hat{W} \quad (2.4)$$

onde  $\hat{A}$  é a matriz de comparações por pares,  $\lambda_{max}$  é o maior autovalor de  $\hat{A}$ , e  $\hat{W}$  é o autovetor correspondente.  $\hat{W}$  constitui a estimativa de  $W$  (ZAHEDI, 1986).

Na Equação (2.4),  $\lambda_{max}$  pode ser considerado como uma estimativa de  $n$  na Equação (2.3). O  $\lambda_{max}$  é sempre maior ou igual a  $n$ . Quanto mais próximo o valor calculado de  $\lambda_{max}$  for de  $n$ , mais consistentes são os valores observados de  $\hat{A}$ . Essa propriedade levou à construção do índice de consistência (CI) e da razão de consistência (CR), Equações (2.5) e (2.6), respectivamente.

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (2.5)$$

$$CR = (CI/ACI) \cdot 100 \quad (2.6)$$

onde  $ACI$  é o índice médio de pesos gerados aleatoriamente. Como regra geral, um valor  $CR$  de 10% ou menos, é considerado aceitável. Em suma, o método do "autovalor" (Equação (2.4)) no

AHP é um método para estimar os pesos relativos -  $W$  - a partir da matriz de comparações por pares (ZAHEDI, 1986).

A etapa 4 também é quando se agrega pesos relativos de vários níveis obtidos na etapa 3 para produzir um vetor de pesos compostos, que servem como classificações das alternativas de decisão do objetivo geral do problema. O vetor de pesos relativos compostos de elementos do nível  $k$ th, em relação ao primeiro nível, pode ser calculado a partir da Equação (2.7).

$$C[1, k] = \prod_{i=2}^k B_i \quad (2.7)$$

onde  $C[1, k]$  é o vetor de pesos compostos dos elementos no nível  $k$  em relação ao elemento no nível 1, e  $B_i$  é a matriz  $n_{i-1}$  por  $n$ , com linhas que consistem do vetores  $\hat{W}$  estimado.  $n_i$ , representa o número de elementos no nível  $i$  e é o mesmo  $n$  que na Equação (2.3), mas é escrito para mostrar que pertence ao nível  $i$  (ZAHEDI, 1986).

Para fazer as comparações, necessita-se de uma escala de números que indicam quantas vezes um elemento é mais importante/dominante que outro em relação ao critério que eles são comparados. A Tabela 1 exibe a escala (SAATY, 2008; TRIANTAPHYLLOU; MANN, 1995).

Uma das etapas mais importantes em muitos métodos de tomada de decisão é a estimativa precisa dos dados pertinentes. Este não é um problema exclusivo do método AHP. Mas é crucial em muitos outros métodos que precisam obter informações qualitativas do tomador de decisão. Muitas vezes, os dados qualitativos não podem ser conhecidos em termos de valores absolutos. Portanto, muitos métodos de tomada de decisão tentam determinar a importância relativa, ou peso, das alternativas em termos de cada critério envolvido em um determinado problema de tomada de decisão. Uma abordagem baseada em comparações por pares, proposta por Saaty em 1980, atraiu o interesse de muitos pesquisadores. As comparações por pares são usadas para determinar a importância relativa de cada alternativa em termos de cada critério. Nesta abordagem, o tomador de decisão deve expressar sua opinião sobre o valor de uma única comparação por par por vez. Normalmente, o tomador de decisão precisa escolher sua resposta. Cada escolha é uma frase linguística. Alguns exemplos dessas frases linguísticas são: "*A é mais importante do que B*", ou "*A é da mesma importância que B*", ou "*A é um pouco mais importante do que B*", e assim por diante (veja também na Tabela 1). O principal problema com as comparações por pares se refere à como quantificar as escolhas linguísticas selecionadas pelo tomador de decisão durante a avaliação. Todos os métodos que utilizam a abordagem comparações por pares, eventualmente expressam as respostas qualitativas de um tomador de decisão em alguns números que, na maioria das vezes, são índices de números inteiros. (TRIANANTAPHYLLOU; MANN, 1995).

Quando se trata de tomada de decisões em grupos, duas questões são levadas em conta: (1) como representar um único julgamento a partir de julgamentos individuais de um grupo e (2)

**Tabela 1:** Escala fundamental dos números absolutos

Intensidade	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Fraca ou leve importância	
3	Moderada importância	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade sobre a outra
4	Mais moderada	
5	Forte importância	Experiência e julgamento favorecem uma atividade em detrimento da outra
6	Mais forte	
7	Muito forte importância	Uma atividade é muito favorecida sobre a outra, seu domínio é demonstrado na prática
8	Muito, muito forte importância	
9	Extrema importância	A evidência favorece uma atividade sobre outra, sendo a mais alta ordem de afirmação possível
Recíprocos acima	Se a atividade $i$ tiver um dos números não-zero acima atribuídos a ele quando comparado com a atividade $j$ , então $j$ tem o valor recíproco quando comparado com $i$	Uma suposição razoável
1.1 - 1.9	Se as atividades são muito próximas	Pode ser difícil atribuir o melhor valor, mas quando comparado com outras atividades contrastantes, o tamanho dos pequenos números não seria muito notável, mas ainda podem indicar a importância relativa das atividades.

Fonte: Adaptado de (SAATY, 2008)

como construir uma escolha individual a partir de grupos de escolhas. A propriedade recíproca desempenha um papel importante na combinação dos julgamentos de vários indivíduos para obter um único julgamento para o grupo. Os julgamentos devem ser combinados para que o recíproco seja igual às sínteses destes. Verificou-se que a média geométrica, e não a média aritmética, frequentemente usada, é a única maneira de fazer isso. Se os indivíduos são especialistas, talvez não desejem combinar seus julgamentos, mas apenas seus resultados finais obtidos por cada um de sua própria hierarquia. Nesse caso, toma-se a média geométrica dos resultados finais (SAATY, 2008).

O AHP e o seu uso em comparações por pares inspirou a criação de muitos outros métodos de tomada de decisão. Além da ampla aceitação, também criou críticas consideráveis; tanto por razões teóricas quanto práticas. Desde os primeiros dias, tornou-se evidente que existem alguns problemas com a forma como as comparações entre pares são usadas e a forma como o AHP avalia alternativas (TRIANAPHYLLOU; MANN, 1995).

## 2.6 Métodos de otimização

De acordo com Luzia e Rodrigues (2009), otimização, ou programação matemática, refere-se a seleção do melhor elemento em um conjunto de alternativas, mediante uma função objetivo (maximização ou minimização) específica que se aproxima de um valor desejado. Atualmente, a otimização é composta pelas seguintes áreas: (I) programação linear; (II) programação inteira; (III) otimização combinatória; e, (IV) otimização estocástica. As meta-heurísticas estão incluídas nos métodos de otimização estocástica, classe geral de algoritmos que empregam algum grau de aleatoriedade para encontrar soluções tão ótimas quanto possível.

De acordo com a definição original, meta-heurísticas são métodos de solução que coordenam procedimentos de busca locais com estratégias de mais alto nível, de modo a criar um processo capaz de escapar de mínimos e máximos locais e realizar uma busca robusta em um determinado espaço de soluções de um problema. Posteriormente, a definição passou a abranger quaisquer procedimentos que empregassem estratégias para escapar de mínimos e máximos locais em espaços de busca de soluções complexas. Em especial, foram incorporados procedimentos que utilizam o conceito de vizinhança para estabelecer meios de fugir dos mínimos e máximos locais. Uma meta-heurística, portanto, visa produzir um resultado satisfatório para um problema, porém sem qualquer garantia de otimalidade (LUZIA; RODRIGUES, 2009).

### 2.6.1 Particle Swarm Optimization

A aplicação da otimização por enxame de partículas foi sugerida pela primeira vez por Eberhart e Kennedy sob o nome de *Particle Swarm Optimization* (PSO) (LYNN; SUGANTHAN, 2017; KAVEH; TALATAHARI, 2009). O PSO é sustentado pelo fato de que as criaturas biológicas descentralizadas (sem supervisão central) podem muitas vezes realizar metas complexas

por meio da cooperação (KAVEH; TALATAHARI, 2009). Entre os algoritmos populacionais evolutivos de inteligência por enxames, o PSO atraiu considerável atenção devido à sua simplicidade e rápida velocidade de convergência (LYNN; SUGANTHAN, 2017).

Neste algoritmo, as variáveis do PSO foram aplicadas com sucesso para resolver problemas de aperfeiçoamento do mundo real (LYNN; SUGANTHAN, 2017). O princípio básico do PSO imita o comportamento social do enxame, como o acasalamento de pássaros e a educação de peixe (LYNN; SUGANTHAN, 2017; EBERHART; KENNEDY, 1995). No PSO, cada partícula do enxame representa uma solução potencial para um problema de otimização. Inicialmente, as partículas são distribuídas aleatoriamente sobre o espaço de busca com valores aleatórios de velocidade. Então, a velocidade de cada partícula é atualizada usando sua própria experiência anterior mais conhecida (melhor local) e a melhor experiência de todo enxame (melhor global) (LYNN; SUGANTHAN, 2017).

Conforme Luzia e Rodrigues (2009), o algoritmo PSO é simples, mas depende de alguns conceitos e etapas:

- Partículas: são as soluções candidatas do problema. As partículas nunca morrem, isto é, não há seleção. Uma partícula consiste em duas partes:
  - A localização da partícula no espaço  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots)$ ;
  - A velocidade da partícula  $\vec{v} = (v_1, v_2, \dots)$ , que indica a direção e a velocidade em que a partícula está viajando na iteração, equivalente a  $\vec{v} = \vec{x}^{(t)} - \vec{x}^{(t-1)}$ ;
- As partículas são inicializadas em posições escolhidas aleatoriamente e com velocidades iniciais também aleatórias. Três informações adicionais também são armazenadas:
  - Para cada partícula, a melhor posição (o melhor valor obtido da função objetivo)  $\vec{x}^*$  da própria partícula;
  - Para cada partícula, a melhor posição  $\vec{x}^+$  de qualquer um dos informantes da partícula - um pequeno conjunto de partículas escolhidas aleatoriamente a cada iteração (uma partícula é sempre informante dela mesma);
  - A melhor posição de qualquer partícula até o momento  $\vec{x}^\dagger$ .
- A cada iteração do algoritmo são executadas as seguintes operações:
  - Julgamento da qualidade da posição de cada partícula e atualização da melhor posição, caso necessário;
  - Atualização do vetor de velocidade  $\vec{v}$  para cada partícula, adicionando três vetores que apontam para  $\vec{x}^*$ ,  $\vec{x}^+$  e  $\vec{x}^\dagger$ ;
  - Atualização da posição de cada partícula com base no vetor de velocidade calculado no passo anterior.

De acordo com Tchomté e Gourgand (2009), o algoritmo base do PSO consiste em um enxame de partículas movendo-se em um espaço de pesquisa n-dimensional e com valor real

de possíveis soluções de problemas. Para o espaço de busca, em geral, uma certa medida de qualidade, a adequação, é definida, permitindo que as partículas comparem diferentes soluções de problemas. Cada partícula  $i$  no momento  $t$  tem as seguintes características:

- $X_{i,t}, V_{i,t}$  são os vetores de posição e velocidade;
- $P_{i,t}$  é uma pequena memória que armazena a melhor posição até o momento;
- $G_{i,t}$  é a melhor posição global.

A cada tempo  $t$ , a velocidade é atualizada e a partícula é movida para uma nova posição. Esta nova posição é simplesmente calculada pela soma da posição anterior com a nova velocidade (Equação 2.8). Quanto à atualização da velocidade, esta é determinada pela Equação 2.9 (TCHOMTÉ; GOURGAND, 2009).

$$X_{i,t+1} = X_{i,t} + V_{i,t+1} \quad (2.8)$$

$$X_{i,t+1} = c_1 \cdot V_{i,t} + c_2 \cdot r_2 \cdot (P_{i,t} - X_{i,t}) + c_3 \cdot r_3 \cdot (G_{i,t} - X_{i,t}) \quad (2.9)$$

onde o parâmetro  $c_1$  é o peso de inércia, que controla a magnitude da velocidade antiga  $V_{i,t}$ . Esse parâmetro pode ser específico para cada componente da partícula e, inclusive, estar diminuindo em cada iteração. Os parâmetros  $c_2$  e  $c_3$  são números reais escolhidos de maneira uniforme e aleatória em um dado intervalo, geralmente  $[0,1]$ ; 1 Esses valores determinam a significância de  $P_{i,t}$  e  $G_{i,t}$ , respectivamente.  $P_{i,t}$  e  $G_{i,t}$  são dois estados, os estados atuais são escolhidos de acordo com alguns valores dos parâmetros. Os três componentes de velocidades são definidos da seguinte forma:

- $c_1 \cdot V_{i,t}$  serve como um termo momentâneo para evitar oscilações excessivas na direção de busca;
- $c_2 \cdot r_2 \cdot (P_{i,t} - X_{i,t})$  refere-se ao componente cognitivo, representa a tendência natural dos indivíduos para retornarem aos ambientes de onde eles experimentaram seu melhor desempenho;
- $c_3 \cdot r_3 \cdot (G_{i,t} - X_{i,t})$  refere-se ao componente social, representa a tendência dos indivíduos seguirem o sucesso de outros indivíduos.

A otimização por enxame de partículas é da mesma classe de um algoritmo genético, na medida em que o sistema é inicializado com uma população de soluções aleatórias. Porém para este, as potenciais soluções, chamadas partículas, são "voadas" no hiperespaço e aceleradas por uma constante. Cada partícula acompanha suas coordenadas no hiperespaço, que estão associadas à melhor solução conhecida até o momento. O valor dessa solução ( $pbest$ ) é armazenado.

Na sequência, outro "melhor" valor também é rastreado. A versão "global" do otimizador do enxame de partículas acompanha o melhor valor geral e sua localização, obtida até agora por qualquer partícula da população; isso é chamado *gbest*. Desta maneira, a otimização por enxame de partículas consiste, a cada passo de tempo, em mudar a velocidade (aceleração) de cada partícula em relação ao seu *pbest* e *gbest*. A aceleração é ponderada por um termo aleatório, com números aleatórios sendo gerados para a aceleração em direção ao *pbest* e *gbest*. Sendo assim, a única variável que deve ser determinada pelo usuário, é a velocidade máxima à qual as partículas são limitadas (EBERHART; KENNEDY, 1995).

A otimização por enxame de partículas compreende um conceito muito simples, e os paradigmas são implementados com poucas linhas de códigos de programação. Ela requer apenas operadores matemáticos primitivos e é computacionalmente barato em termos de requisitos de memória e velocidade de processamento (EBERHART; KENNEDY, 1995). O algoritmo PSO padrão é inicializado com uma população (enxame) de potenciais soluções aleatórias (partículas). Cada partícula se desloca iterativamente através do espaço de busca e é atraída pela posição da melhor forma física (avaliação da função objetivo) obtida historicamente pela própria partícula (melhor local) e pelo melhor entre vizinhos da partícula (melhor global). Essencialmente, cada partícula fica continuamente e reorienta o esforço de sua pesquisa de acordo com o melhor local e global. Essa adaptação cultural de um agente biológico em um enxame: (i) avalia sua própria posição com base em certos critérios de aptidão física e (ii) se compara com outros agentes e imita o melhor em todo o enxame (KAVEH; TALATAHARI, 2009; EBERHART; KENNEDY, 1995).

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

De acordo com Lacerda et al. (2013), para garantir a solidez e a relevância de uma pesquisa, tanto pelo campo acadêmico quanto pelo social, ela deve demonstrar que foi desenvolvida com o devido rigor que permita o debate e a verificação desta, garantindo assim a sua replicabilidade. Os métodos de pesquisa procuram apresentar um conjunto de etapas, aceitos pela comunidade acadêmica, com o objetivo de construir conhecimento acadêmico em um determinado campo de pesquisa, sendo esta uma crescente preocupação na engenharia de produção (MIGUEL, 2007; LACERDA et al., 2013). Em decorrência de interesses práticos que visam à aplicação de ferramentas para a solução de problemas específicos, este trabalho classifica-se como pesquisa aplicada de abordagem quantitativa, embasado por processos de tomada de decisão e de modelagem (MANSON, 2006). Desta maneira, este projeto será conduzido sob o enfoque de uma pesquisa aplicada quantitativa, visto que visa gerar conhecimentos para a aplicação prática dirigido à solução de problemas específicos. Este projeto também pode ser considerado como exploratório experimental, pois apresenta um modelo com dados reais de uma empresa a fim de apresentar um processo de tomada de decisão para o planejamento de arranjos industriais (SILVA; MENEZES, 2005; GIL, 2017).

A pesquisa operacional (PO) trata da aplicação de métodos científicos a problemas complexos com o intuito de auxiliar no processo de tomada de decisão, tal como, a alocação eficiente de recursos produtivos, desenvolvendo métodos científicos para analisar sistemas complexos. Em geral, para a análise destes sistemas, a formulação de um modelo matemático se faz necessário, onde fatores de um problema real precisam ser considerados e a validação do modelo matemático deve ser coerente com o contexto original. Sendo assim, a PO e a programação matemática fazem o uso de modelos matemáticos que procuram representar/imitar um problema real (MANSON, 2006).

Como este estudo se caracteriza por um processo de pesquisa por modelagem, ele pode ser enquadrado como modelagem computacional. Com os avanços em matemática e estatística aliados aos novos conceitos da ciência da computação, a manipulação das variáveis se faz possível, proporcionando a análise entre causa e efeito de um determinado fenômeno (MIGUEL, 2012). A rigidez/garantia de um modelo (através da pesquisa por modelagem) se dá pela definição de pontos de controle para evitar a interferência de variáveis intervenientes, interferindo diretamente nos dados pela manipulação da variável independentes e observação do que ocorre com a variável dependente. Tal procedimento permite ao pesquisador avaliar se as conclusões inferidas mostram necessidade de revisão do modelo proposto, o que implica na repetição deste ciclo até à adequação do modelo matemático (PRODANOV; FREITAS, 2013; MIGUEL, 2012).

Uma vez definido o tema e o objetivo geral da pesquisa, tem-se como princípio a busca pelo referencial teórico como instrumento de suporte. Nesta etapa, foram levantadas informações sobre os tipos de arranjo físico, métodos para planejamento de layout, ferramentas para tomada de decisão e heurísticas para a modelagem do problema. O levantamento do referencial teó-

rico orientou-se pela busca de artigos que tratam-se sobre o problema de pesquisa, sendo estes encontrados nas seguintes bases de dados: *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *Emerald*, *EBSCO*, *Wiley*, *Taylor & Francis Group*, *SAGE Journals* e *Portal de Periódicos CAPES/MEC*, na identificação de artigos relacionados ao *gap* de pesquisa. As principais palavras-chave utilizadas foram: *Layout*, *Facility Layout Problem*, *Systematic Layout Planning*, *Analytic Hierarchy Process*, *Particle Swarm Optimization* e "*facility layout problem*" and "*metaheuristic*", incluindo traduções equivalentes em língua portuguesa, no período de 2013 a 2018 (exceto por alguns artigos que serviram como base para identificação do *gap* de pesquisa).

### 3.1 Etapas da pesquisa

O desenvolvimento desta dissertação originou-se da união de dois artigos decorrentes do primeiro ano do mestrado acadêmico. O primeiro artigo tratou sobre o planejamento de leiautes industriais por ferramentas de planejamento e de tomada de decisão, onde o objetivo era avaliar o arranjo atual e propor melhorias para a nova fábrica que estava sendo construída pela empresa em questão. Já o segundo artigo visava a proposição de um modelo para o planejamento de leiautes através da otimização por algoritmos/meta-heurísticas, onde o intuito era aplicação no mesmo caso (permitindo a comparação com o SLP). Então, a união deste dois artigos possibilitou a avaliação de qual método é mais eficiente no planejamento de leiautes industriais, onde existia uma lacuna de pesquisa sobre a comparação destes.

O método aqui proposto é dividido por seis etapas que definem como esta pesquisa se desenvolveu. O Quadro 5 apresenta todas as estas etapas. Na sequência, é apresentado detalhadamente cada etapa, explicando o que se desenvolveu em cada uma. O intuito destas etapas é a replicação desta pesquisa.

**Quadro 5:** Etapas da dissertação

ETAPA 1	Revisão da literatura (artigos, livros, dissertações, teses, etc.) Estruturação do modelo de pesquisa
ETAPA 2	Análise das características do ambiente a ser estudado Entrevistas com a gerência/supervisão de cada setor Coleta dos dados de acordo com o fluxo de produção
ETAPA 3	Utilizar os dados para validação do método por simulações Análise da qualidade dos resultados simulados pelos dados coletados Fazer ajustes, se necessários
ETAPA 4	Realização dos experimentos após validação das simulações Construir uma tabela/matriz com os valores obtidos de cada resultado
ETAPA 5	Contatar as partes envolvidas com o processo produtivo Analisar os resultados obtidos com as partes envolvidas Re-simulação, se os resultados não estiverem de acordo
ETAPA 6	Definir as implicações teóricas de cada conceito Prover esclarecimentos para replicação dos resultados obtidos

Na etapa 1 é efetuada a revisão da literatura para conhecimento do método proposto e como este irá transcorrer. A revisão da literatura, principalmente a leitura de artigos, garante que este assunto foi revisado e permite confiabilidade aos leitores que pretendem replicar este estudo. Também, tem-se por meta encontrar lacunas de pesquisa que tornem este assunto relevante. O objetivo de se definir um método coerente com esta pesquisa, diz respeito à fácil compreensão do modelo proposto, ou seja, que o meio acadêmico e social, principalmente empresários, possam lê-lo e entendê-lo. A definição da estrutura conceitual teórica é um dos principais meios, aos não leigos sobre este assunto, para entendimento da pesquisa que está sendo desenvolvida.

Já na etapa 2, deve-se analisar as características dos ambientes que vão ser estudados, ou seja, conhecer suas necessidades e especificações, entender o processo produtivo e verificar a característica de cada atividade. As entrevistas com a gerência ou supervisão, pessoas diretamente ligadas com aquele processo, permite o esclarecimento de dúvidas e a obtenção de dados para o planejamento do leiaute. A coleta de dados deve ser de acordo com o fluxo de produção, este pode ser obtido de um histórico fornecido pelo sistema informatizado, ou pela previsão de demanda e simulação do fluxo entre setores (sugere-se a construção de uma tabela com os valores coletados, pois estes servem de *backup* para novos testes). O objetivo de planejar previamente o caso, diz respeito ao conhecimento do leiaute global da empresa, para que assim seja possível a condução do teste piloto.

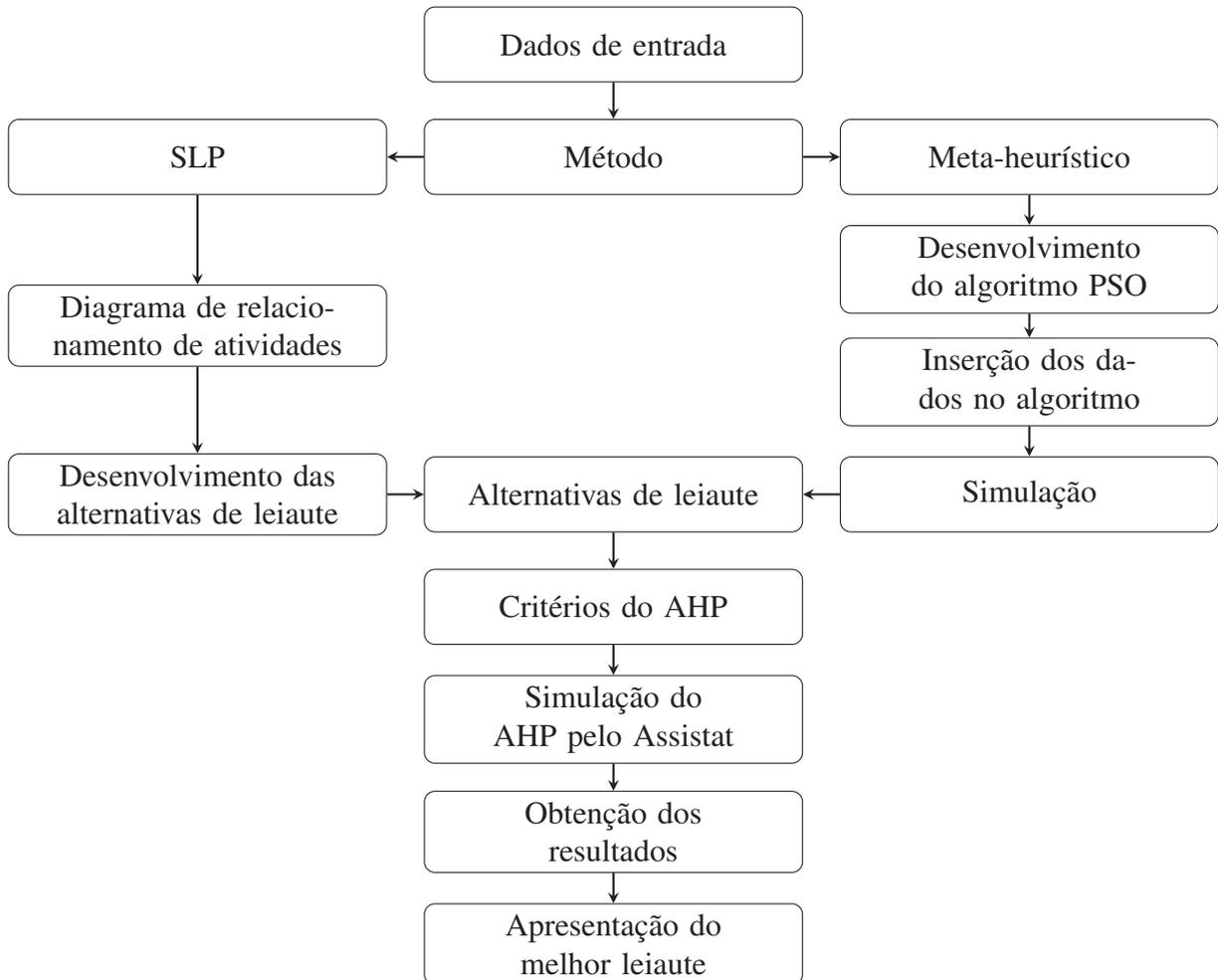
A etapa 3 representa a condução do teste piloto, onde as variáveis são testadas de acordo com o planejamento do caso. São utilizados os dados coletados para a validação do método, onde tem-se como meta avaliar os resultados obtidos a partir das simulações, para que não haja inconsistência nas respostas que serão obtidas. Se necessário, deve-se proceder com ajustes para que a ferramenta forneça o melhor resultado possível. Uma simulação prévia permite a validação do objetivo da pesquisa, e é ela que permite dar o início à coleta de dados reais do processo produtivo.

Na etapa 4 são realizados os experimentos após a validação do método proposto com as simulações. Os experimentos irão fornecer os resultados finais que serão comparados entre si e apresentados para a gerência/supervisão da empresa em análise. Estes resultados serão inseridos em tabelas para comparações das propostas e compilação dos valores obtidos. Com estas tabelas, será possível avaliar qual resultado se destaca em determinada característica e aplicar o método de tomada de decisão para o melhor resultados, entre os obtidos nos experimentos.

A etapa 5, análise dos resultados, diz respeito à verificação dos resultados obtidos com a coleta de dados. Para verificação destes, é de suma importância a participação das partes envolvidas, pois são elas que auxiliaram na verificação destes. Visto que os resultados podem não ser os "melhores" para empresa, sendo necessário uma nova simulação.

Por fim, na etapa 6, estes resultados devem ser discutidos, verificando se estão de acordo com a teoria e quais suas implicações. Os resultados obtidos devem ser esclarecidos para futuras replicações/re-simulações. Permitindo que gestores/supervisores de empresas de pequeno e médio porte possam replanejar a sua estrutura de leiaute.

Para tornar mais evidente as etapas citadas anteriormente, elaborou-se um fluxograma do processo de planejamento de leiaute, Figura 3. O fluxograma desenvolvido para esta pesquisa fornece os passos que devem ser seguidos para obter sucesso no planejamento de leiaute. Este fluxograma permite a replicar o método aqui desenvolvido.



**Figura 3:** Processo de planejamento do leiaute  
Fonte: Elaborado pelo autor

Seguindo as etapas de Fluxograma da Figura 3, previamente é necessário inserir os dados para o planejamento do leiaute industrial, sendo eles, fluxo de material, tamanho dos setores, portões de entrada e saída e a distância entre setores (corredores). Após a coleta dos dados, deve-se decidir qual método empregar (SLP ou meta-heurístico), neste caso os dois serão empregados para comparação dos resultados. A seleção do método de planejamento de leiaute é uma consequência do número de setores e da complexidade das variáveis.

Se selecionar o método SLP, deve-se elaborar o diagrama de relacionamento e dispor os setores de acordo com a importância de proximidade, este processo ocorrerá pela distribuição adimensional de blocos (para tornar mais realística esta etapa, sugere-se o uso de blocos com os tamanhos aproximados de cada setor). Após, serão definidos os critérios para a tomada de decisão da melhor proposta de leiaute definida no método SLP. Os valores mensurados serão

transmitidos em relação ao seu grau de importância, pela comparação por pares. Os valores definidos na etapa anterior serão utilizados para comparar qual a melhor proposta planejada com o *software* Assistat. Por fim, será selecionado o leiaute que atenderá as necessidades da empresa. Este resultado será apresentado para a empresa em análise.

Senão, será utilizado o método meta-heurístico, o algoritmo *Particle Swarm Optimization*. Os dados coletados serão inseridos no algoritmo, e serão definidos os critérios do método meta-heurístico. Os dados serão simulados, gerando a "melhor" proposta de leiaute, ou seja, aquela que melhor atenda as necessidades da empresa; visando à redução de custos. Se o resultado não for aceitável, este deverá ser reavaliado através da verificação dos parâmetros do algoritmo, e efetuada uma nova simulação dos dados. Após, com uma proposta de leiaute aceitável, esta deverá ser apresentada para a empresa em análise.

### 3.2 Ferramentas computacionais

Para a análise dos dados levantados na etapa decisória, será utilizado um *software* de assistência estatística, o Assistat. O *software* desenvolvido pelo professor Dr. Francisco de A. S. e Silva da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Brasil, tem como intuito analisar os dados do método AHP. O Assistat é um *software* utilizado para análise de variância, tendo sua difusão ampliada nos últimos anos por alunos de Graduação, Pós Graduação, Mestrado e Doutorado. O *software* normaliza a matriz AHP e simula os valores de acordo com as fórmulas deste método. Segundo o *software*, os valores de RI são tabelados de acordo com as escalas propostas por Saaty e Ramos, e uma reavaliação da matriz de comparação poderá ser necessária caso o valor de CR seja maior que 0,1. Também, se for do interesse do projetista, o mesmo pode imprimir os resultados fornecidos pelo Assistat. (SILVA; AZEVEDO, 2016).

Já para o desenvolvimento do algoritmo PSO, será utilizado o programa MATLAB. Este é um poderoso sistema de computação e é aplicado para lidar com cálculos científicos de engenharia, permitindo uma linguagem de alto nível e um ambiente interativo (HUNT; LIPSMAN; ROSENBERG, 2014; HAHN; VALENTINE, 2016). O nome MATLAB significa "*Matrix Laboratory*", pois foi projetado para tornar fácil a computação de matrizes (HAHN; VALENTINE, 2016). Usando o MATLAB, você pode analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos e aplicativos (HUNT; LIPSMAN; ROSENBERG, 2014). Para muitos problemas técnicos, você insere apenas um ou dois comandos e o MATLAB faz a maior parte do trabalho para você (HAHN; VALENTINE, 2016). As ferramentas e as funções matemáticas incorporadas no MATLAB, permitem que você explore várias abordagens e alcance uma solução mais rápida do que com planilhas ou linguagens tradicionais de programação, como C/C++ ou Java (HUNT; LIPSMAN; ROSENBERG, 2014; HAHN; VALENTINE, 2016). Uma das principais vantagens do MATLAB, em relação às linguagens de tradicionais de programação, é que você pode usá-lo de forma interativa (HAHN; VALENTINE, 2016).

#### 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A empresa em análise é do ramo gráfico, ou seja, produz embalagens flexíveis para alimentos, rações, materiais elétricos, entre outros produtos que utilizem embalagem plástica para armazenagem de produtos. Está situada atualmente na região central do Rio Grande do Sul, em uma área de aproximadamente três mil metros quadrados, tendo já passado por várias reformulações desde a sua criação. O seu leiaute foi replanejado inúmeras vezes, conforme o crescimento da empresa. Os setores que hoje a compõem, foram planejados pela experiência fabril de funcionários que estavam diretamente ligados ao processo produtivo. O procedimento de planejamento de leiaute levava em consideração os espaços disponíveis para a inserção de novas máquinas. A planta era planejada sem o auxílio de ferramentas gerenciais. Desta maneira, utilizando apenas a experiência e o conhecimento do processo, acarretou em diversas unidades que separam o prédio em partes. Por consequência, estas ampliações impactaram na descentralização de alguns setores.

Como a empresa em análise se encontra em um espaço limitado, dificultando o seu crescimento e o planejamento do leiaute do processo produtivo, teve-se como premissa a aquisição de um novo terreno e a construção de uma nova fábrica, fora da área central do município em que se encontra atualmente. Isso permitiu elevar a capacidade de produção, a redução de custos por movimentação de materiais, a aquisição de novos equipamentos e o replanejamento do leiaute.

O planejamento deste leiaute considerou as necessidades internas da empresa. A primeira dizia respeito à aquisição de novas máquinas, pois o espaço físico atual não comporta uma nova capacidade produtiva. A segunda, considera também que este novo espaço permita a adoção de normas como, Boas Práticas de Fabricação (BPF), ISO 22000 e TS 22000, requisitos de qualidade em produção de embalagens. Outra, que teve forte impacto no projeto de leiaute, foi a necessidade de ganho de área, e a última necessidade da empresa, levava em consideração a possibilidade de incremento de produtos.

As dimensões dos setores e o espaçamento entre eles, foram definidos de acordo com o tamanho dos equipamentos que se encontram na fábrica atual da empresa, prevendo espaços mais amplos para a movimentação de materiais e pessoas. Inclusive, foram considerados espaços para reserva técnica no caso de aquisição de novos equipamentos, projetando que estes ocupem espaços maiores que os atuais, visto que o mercado está partindo para máquinas mais robustas e com alta capacidade produtiva. Os setores de transformação, extrusão, impressão, laminação e rebobinagem, foram planejados com dobro do tamanho necessário, considerando-se duplicar a produção atual. Comparando o leiaute antigo com a visão para a nova proposta, têm-se como premissa manter os setores existentes, porém, readequar a distribuição destes de acordo com cada etapa do processo produtivo. Desta maneira, cada setor terá seu espaço bem caracterizado, separado por barreiras físicas que evitam a contaminação de materiais. Sendo assim, a empresa permanece com os mesmos setores, porém redistribuídos para atender novas normas de fabricação, o que permite a entrada em novos mercados.

#### 4.1 Coleta de dados

Como esta pesquisa utilizada dados reais de uma empresa a ser explorada, procedeu-se com uma visita inicial para conhecimento do processo produtivo, das características desta, do fluxo de produção e entrevista com as partes envolvidas. A partir desta preliminar, foi possível determinar o tipo de leiaute a ser definido e de que forma este modelo irá auxiliar no planejamento ou replanejamento do mesmo.

Na coleta dos dados, foram identificados dez setores que fazem parte do processo produtivo para a produção de embalagens, sendo eles: extrusão (EXT), almoxarifado (ALM), impressão (IMP), revisão (REV), laminação (LAM), metalização (MET), parafinagem (PAR), rebobinagem (REB), corte e solda (CeS) e expedição (EXP). No planejamento destes setores, foi considerada a alocação dos mesmos em uma nova planta industrial, ou seja, não há restrições em relação à área total, pois a empresa está em processo de planejamento de uma nova unidade. E ao obter o conhecimento de cada etapa do processo produtivo, partiu-se para a definição das características/peculiaridades de cada atividade, tal como, a definição do fluxo de produção (quantidade de material enviado de um setor para outro), dados disponíveis no sistema informatizado da empresa em questão, Tabela 2.

**Tabela 2:** Fluxo de materiais

	EXT	ALM	IMP	REV	LAM	MET	PAR	REB	CeS	EXP
EXT	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
ALM	0%	0%	30%	0%	30%	5%	10%	5%	5%	15%
IMP	0%	0%	0%	64%	0%	0%	8%	28%	0%	0%
REV	0%	0%	0%	0%	56%	44%	0%	0%	0%	0%
LAM	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	97%	0%	0%
MET	0%	0%	0%	0%	38%	0%	0%	35%	27%	0%
PAR	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
REB	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	34%	66%
CeS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
EXP	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

O setor de extrusão da empresa em análise produz bobinas de polietileno (PE) e polipropileno (PP), que são enviadas ao setor de almoxarifado. Em 100% dos casos, conforme apresentado pelo gerente de produção, o material que sai da extrusão vai direto para o almoxarifado. O almoxarifado, envia as bobinas de PE, PP, polipropileno bi-orientado (BOPP), poliéster ou polietileno tereftalato (PET), papel e alumínio aos setores de impressão e laminação, e em alguns casos, para parafinagem, metalização, rebobinagem e corte e solda, sendo estas ocorrências não muito frequentes; inclusive, tem-se como objetivo compartilhar os funcionários com o setor de expedição. Este dado foi apresentado pelo Líder de Almoxarifado e o Gerente de Suprimentos. Para os demais setores, impressão, parafinagem, revisão, metalização, laminação, rebobinagem e corte e solda, os dados foram coletados do sistema informatizado da empresa, e filtrados

para fornecer a porcentagem do material que é produzido e enviado para a atividade seguinte. Os dados foram exportados do sistema conforme os valores fornecidos pelos apontamentos de produção. O levantamento da porcentagem veio da relação de quanto do total produzido foi enviado para a etapa seguinte, desta maneira cada setor teve uma porcentagem de recebimento de material produzido na etapa anterior.

Tratando das características do processo produtivo, a altura do prédio onde ficará alocado o setor de extrusão deve ser considerada; pois, por este possuir uma máquina com torre de extrusão de altura elevada (quinze metros), é necessário deixá-la alocada em uma das extremidades da planta, devido à altura ser superior aos demais setores. Quanto ao setor de impressão, este deve estar separado do processo produtivo, ou seja, não pode ter contato direto por apresentar risco de explosão; desta maneira, foi definido que o setor de impressão deve respeitar uma distância mínima de dez metros em relação aos demais. Por fim, deve-se considerar os pontos de entrada (*input*) e saída (*output*) dos materiais; os valores representados vão de zero a um, onde zero é o vértice inicial, e um representa uma volta completa no setor. Portanto, para garantir que estes critérios sejam atendidos, a formulação da proposta no *Systematic Leiaute Planning* e do modelo no algoritmo devem levar em consideração estes detalhes. Sendo assim, estas características levantadas encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3:** Dimensões dos setores

Setor	Largura (m)	Comprimento (m)	Afastamento (m)	Input	Output
Extrusão	37	32	02	0.50	0.50
Almoxarifado	22	37	02	0.00	0.75
Impressão	31	54	10	0.62	0.62
Revisão	09	08	02	0.87	0.37
Laminação	15	17	02	0.00	0.00
Metalização	15	15	02	0.25	0.20
Parafinadora	11	14	02	0.00	0.00
Rebobinagem	11	33	02	0.00	0.75
Corte e Solda	16	33	02	0.75	0.00
Expedição	15	33	02	0.12	0.60

## 4.2 Planejamento das propostas de leiaute

### 4.2.1 *Systematic Leiaute Planning*

Em um projeto de leiaute pelo *Systematic Leiaute Planning* (SLP), deve-se considerar dois diagramas para a elaboração da planta, o de relação de atividades e o de blocos. O diagrama de relação de atividades (Figura 4) teve como princípio definir o grau de importância entre os setores, definindo assim as proximidades entre eles. Já o diagrama de blocos, é a representação do projeto de leiaute. Desta maneira, estes dois processos dão o início para o planejamento da

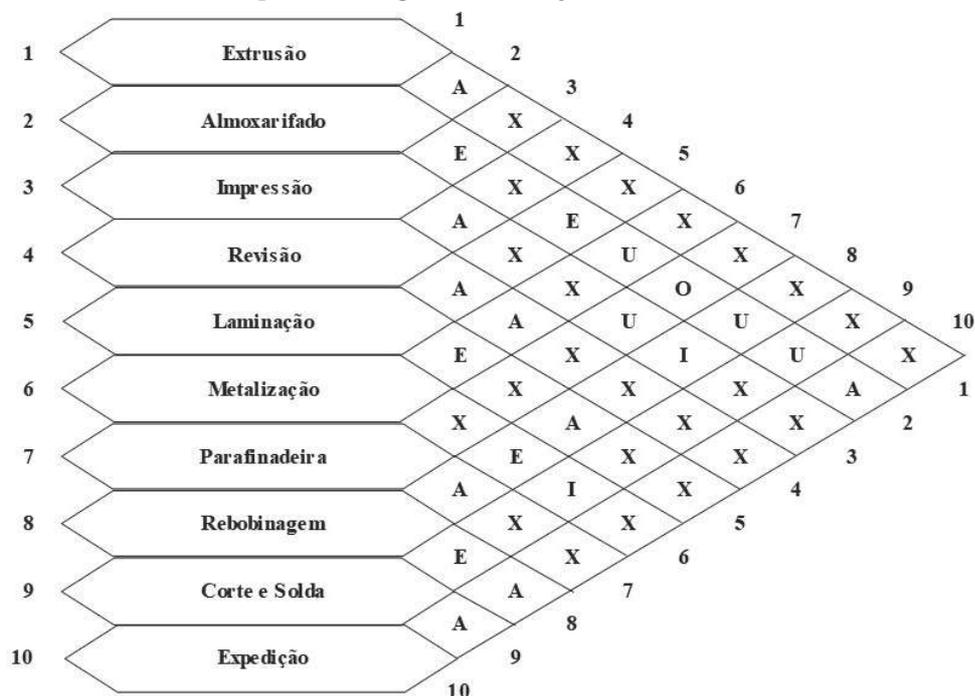
planta fabril, permitindo entender o processo e elaborar as possíveis propostas de leiaute.

O diagrama de relação de atividades tem como função apresentar o nível de importância ou proximidade de um setor em relação ao outro. O diagrama é elaborado conforme dados levantados da produção, ou de definições em conjunto com os gerentes e supervisores que estão diretamente ligados aos setores analisados. A definição da importância fica transcrita no cruzamento da reta entre os setores. A porcentagem dos critérios definidos na Tabela 4 serve como guia de elaboração do diagrama de relação de atividades. Estes valores foram definidos em conjunto com os gestores de produção da empresa em análise. Desta maneira, pode-se definir a importância quando se compara setor com setor, utilizando os dados dados de fluxo de material (Tabela 2).

**Tabela 4:** Guia para o diagrama de relação de atividades

Código	Definição	Critérios
A	Absolutamente importante	$50\% \leq X \leq 100\%$
E	Especialmente importante	$30\% \leq X < 50\%$
I	Importante	$20\% \leq X < 30\%$
O	Pouco importante	$10\% \leq X < 20\%$
U	Sem importância	$05\% \leq X < 10\%$
X	Não desejável	$00\% \leq X < 05\%$

Com os dados do processo produtivo, calculados e analisados, pode-se definir o diagrama de relação de atividades, Figura 4. No diagrama, deve-se indicar com um código alfabético, qual a importância da proximidade de um setor com outro. Este código deve ficar inscrito no cruzamento de dois setores, o código para preenchimento do gráfico deriva das Tabelas 4 e 2. Este processo é repetido para os demais setores, até que todo diagrama esteja preenchido e se possa realizar a próxima etapa, que é um quadro síntese do diagrama de relação de atividades.

**Figura 4:** Diagrama de relação de atividades

Fonte: Elaborado pelo autor

Este quadro (Quadro 6), tem como objetivo facilitar o entendimento da Figura 4. O seu desenvolvimento, permite a estruturação do diagrama de blocos. Desta maneira, é possível planejar o projeto de leiaute da empresa conforme as suas características.

**Quadro 6:** Quadro de relação de atividades

Atividades	A	E	I	O	U	X
1. Extrusão	2					3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10
2. Almojarifado	1; 10	3; 5		7	6; 8; 9	4
3. Impressão	4	2	8		7	1; 5; 6; 9; 10
4. Revisão	3; 5; 6					1; 2; 7; 8; 9; 10
5. Laminação	4; 8	2; 6				1; 3; 7; 9; 10
6. Metalização	4	5; 8	9		2	1; 3; 7; 10
7. Parafinadeira	8			2	3	1; 4; 5; 6; 9; 10
8. Rebobinagem	5; 7; 10	6; 9	3		2	1; 4
9. Corte e Solda	10	8	6		2	1; 3; 4; 5; 7
10. Expedição	2; 8; 9					1; 3; 4; 5; 6; 7

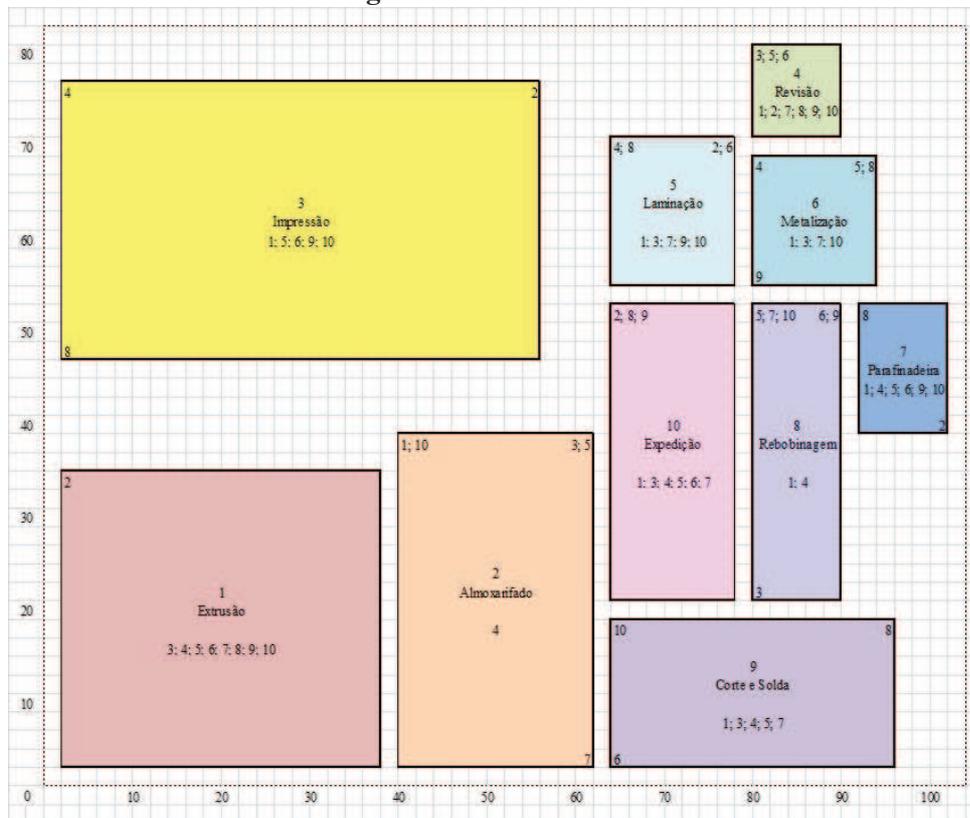
O diagrama de blocos é um processo que serve de auxílio ao planejamento do leiaute. Ele está relacionado com o fluxo de materiais e os dados levantados no diagrama de relação de atividades. Esta etapa inicia com a montagem de uma tabela com os dados do diagrama de relação de atividades, após, estes são transcritos em um quadro que sintetiza-o. Concluída a etapa anterior, pode-se iniciar as simulações das propostas de leiaute conforme os critérios de proximidade para montagem da planta fabril. O quadro deve ser composto pelas atividades

levantadas e os códigos de proximidades. Em cada linha, deve-se preencher, na respectiva coluna, com o número que corresponde com a proximidade que foi definida na comparação entre os setores. Ao finalizar o Quadro 6, procede-se com a transcrição dos valores para os blocos que representam os setores do processo produtivo.

Para a empresa em análise, foram empregados dez blocos, colocando o nome e número de cada um no centro do quadro. Os valores de proximidade foram indicados nos cantos e no centro, de acordo com o nível de importância. Os quadros representaram o tamanho aproximado que deve ter cada setor. Desta maneira, nos cantos superiores, esquerdo, ficaram dispostas as atividades com o código “A”, e direito, as tarefas com o código de importância “E”. Nos cantos inferiores estão distribuídas as relações de código “I” e “O”, ficando do lado esquerdo e direito, respectivamente. As atividades de código “U” ficam de fora dos quadros, estas são omitidas. E no centro ficam as relações “X”, abaixo do número ou nome da atividade. Uma vez que as dez atividades estejam listadas, deve-se distribuir as etapas que compõem o processo da empresa de maneira que satisfaça o projeto de leiaute. Avaliando todas as possibilidades que sejam necessárias no planejamento.

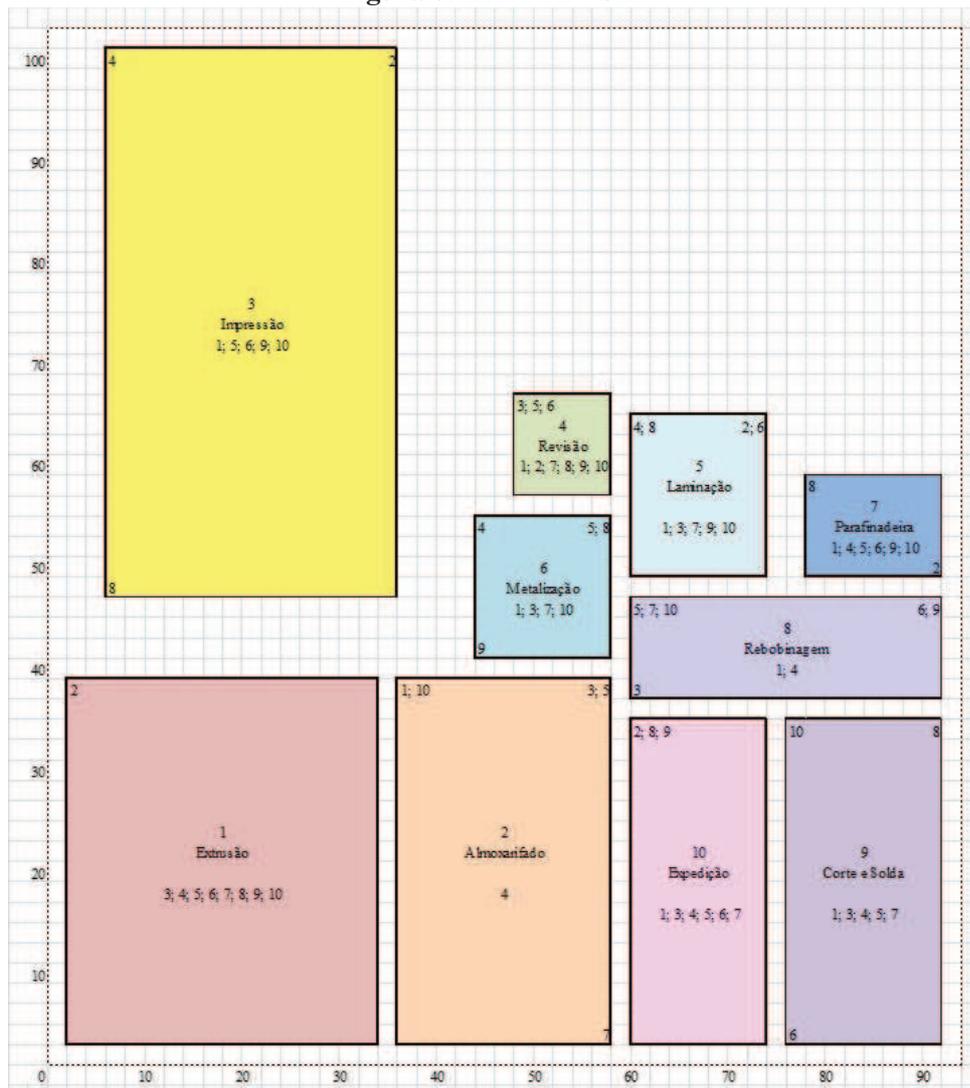
Deve-se iniciar com a atividade considerada a mais importante, que inicia o fluxo de produção, e prosseguir com as demais até que todos os setores estejam distribuídos no conforme critérios do SLP. Após distribuição dos setores, foram definidos cinco projetos de leiaute. Estes projetos originaram-se da união dos blocos, respeitando os critérios definidos pela teoria estudada. As Figuras 5, 6, 7, 8 e 9 representam estas propostas de leiaute. Considerando que a Figura 9 foi planejada pela empresa em questão.

**Figura 5:** Leiaute 1 - SLP



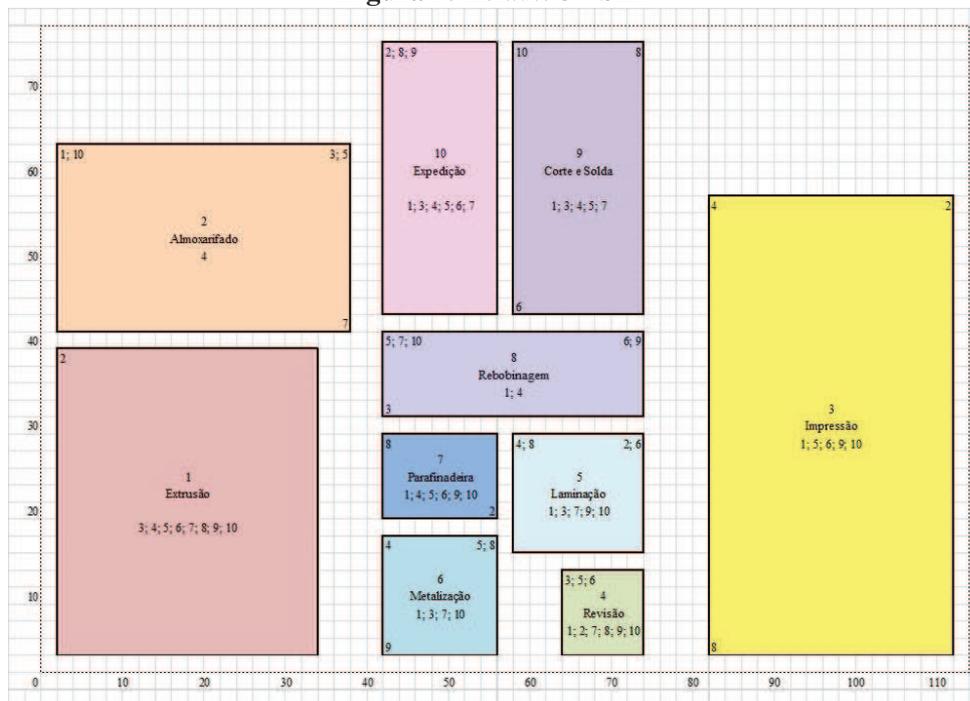
Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 6:** Leiaute 2 - SLP



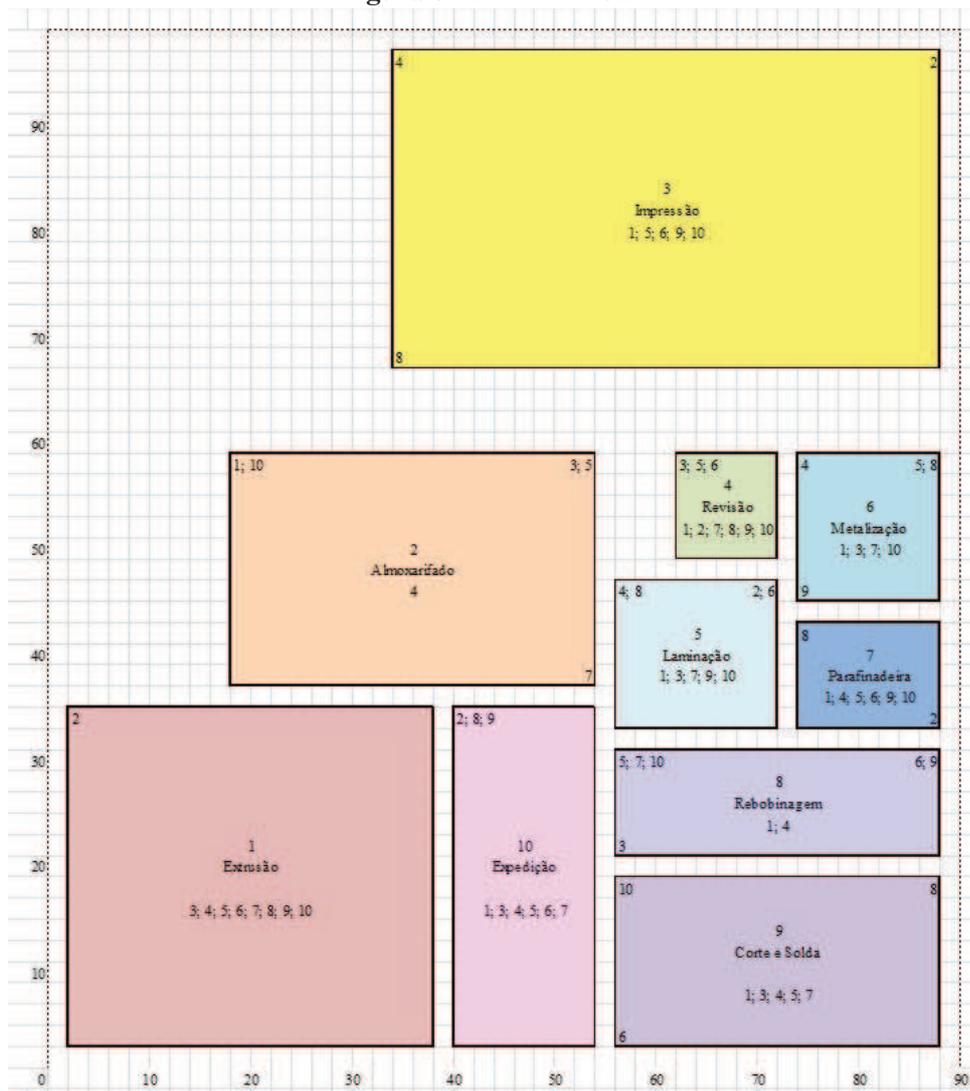
Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 7:** Leiaute 3 - SLP



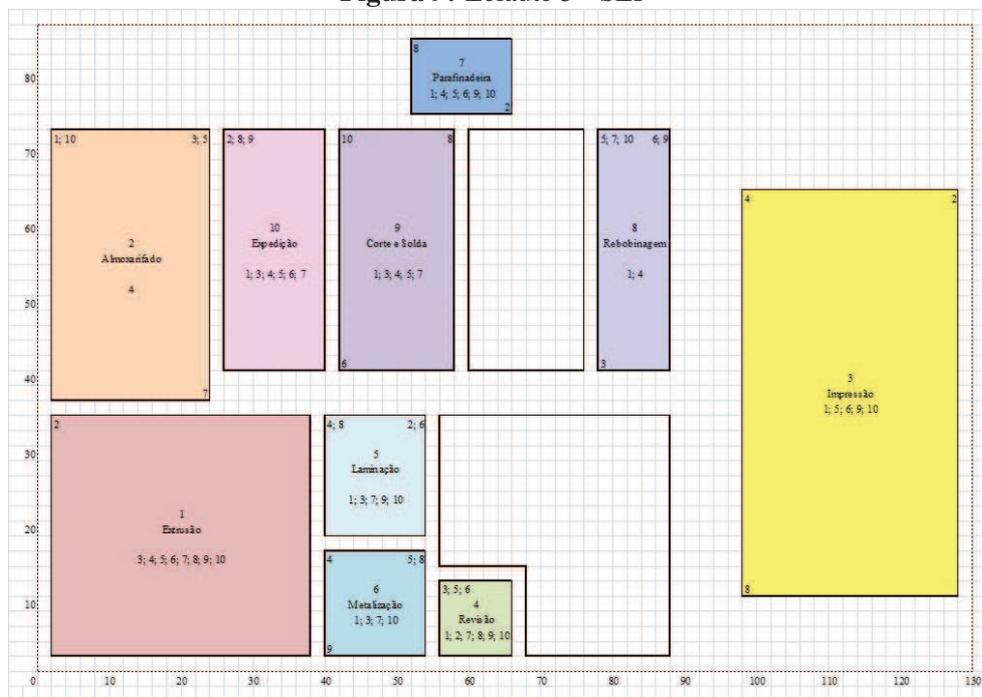
Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 8:** Leiaute 4 - SLP



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 9:** Leiaute 5 - SLP



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.2 Particle Swarm Optimization

Após análise do referencial teórico sobre métodos heurísticos e meta-heurísticos para o planejamento de leiaute, considerou-se a aplicação do *Particle Swarm Optimization* (PSO) devido ao seu alinhamento com o problema e as lacunas de pesquisas existentes. Desta maneira, procedeu-se com a pesquisa em bases de dados, com códigos Matlab, que utilizassem este método para o planejamento de leiautes. Na base de dados Yarpiz (2015), foi identificado um algoritmo PSO que se enquadrava no problema de pesquisa e que possuía similaridade com o estudo em questão. Porém, foi necessário adaptar o modelo do mesmo, alterando as variáveis para o caso em questão, de acordo com as características identificadas durante as visitas na empresa. Sendo assim, a função responsável pela definição do modelo foi reescrita, mas a estrutura principal foi mantida.

Com os dados da empresa coletados, partiu-se para a estruturação da função objetivo (Equação 4.1) e do algoritmo base do PSO (Algoritmo 1). O algoritmo base apresenta a operacionalização do PSO para o planejamento de leiautes, onde, inicialmente, define-se o modelo de acordo com as características da empresa. No modelo, são inseridos dados referentes ao processo produtivo. Ou seja, fluxo de produção, porcentagem de material enviado de um setor para o outro (prioridades de aproximação), largura e comprimento das áreas produtivas, espaçamento entre departamentos (corredores), portões de entrada e saída e número de variáveis (representado pelos setores). Na sequência, são estabelecidos os parâmetros da população, sendo a definição do critério de parada e o número de população utilizado na simulação. Ao definir os parâmetros, deu-se início à simulação pelo PSO, onde o algoritmo, pela busca local, efetua um melhoramento na solução proposta, aproximando os setores o máximo possível (respeitando os critérios definidos no início do modelo).

$$f(x) \text{ minimizar } SumAD + UnusedAreaCost + alpha * v \quad (4.1)$$

onde: “*SumAD*” representa a relação entre fluxo de material  $\times$  distância entre setores, sendo a soma de todas as relações; “*UnusedAreaCost*” é o espaço inutilizado, ou seja, onde não há a alocação de setores; “*alpha*” é uma constante de  $1 \times 10^{12}$ ; e “*v*” é a variável que evita a sobreposição entre os setores, podendo ser considerado como um sistema de penalização. Quanto às restrições da empresa, estas já são consideradas na construção da função modelo.

```

1 Create model;
2 Set stopping criterion;
3 Set population size;
4 Set parameters;
5 Initialization;
6 while (stop criterion is not reached) do
7   for (each population) do
8     | Construct the solutions;
9   end
10  for (it=1:MaxIt) do
11    |
12    | Motion on xhat;
13    | Motion on yhat;
14    | Motion on rhat;
15  end
16  NewParticle = GlobalBest; {Apply Local Search}
17  NewParticle.Position =
18    ImproveSolution(GlobalBest.Position, model, Vars); {Improve Global Best}
19  if (NewParticle.Cost <= GlobalBest.Cost) then
20    | GlobalBest = NewParticle;
21  end
22  BestCost(it) = GlobalBest.Cost; Plot Solution; Store Best Cost;
23 end

```

**Algoritmo 1:** Pseudocódigo Algoritmo PSO adaptado de Yarpiz (2015)

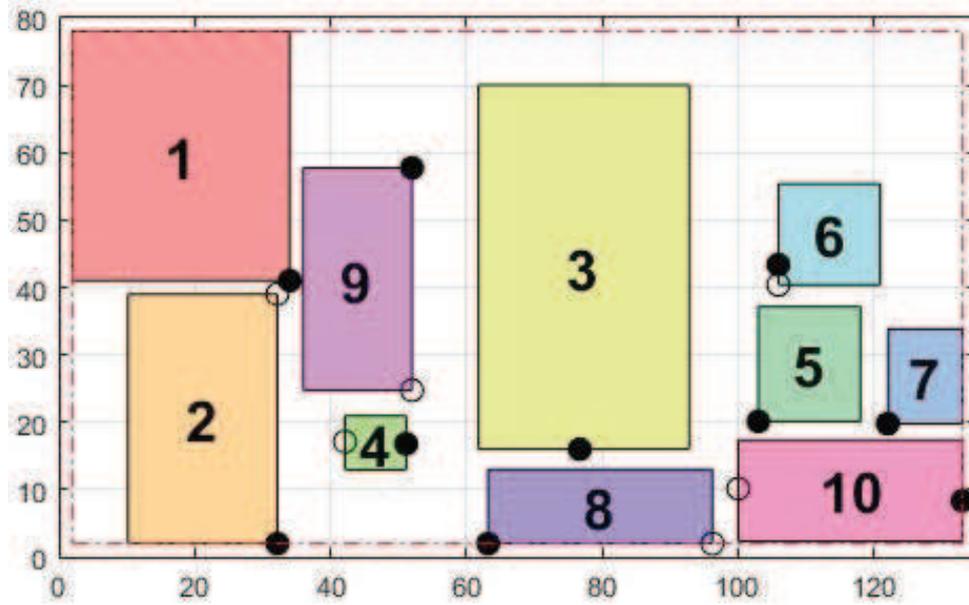
Para converter os dados coletados, Tabela 3, ao algoritmo PSO, iniciou-se pela modelagem das dimensões da empresa em questão (estrutura que pode ser replicada para outras empresas de pequeno e médio porte). Desta maneira, em uma matriz, foram atribuídos os valores referentes aos tamanhos dos setores produtivos, largura e comprimento. Inclusive, com os dados de comprimento, o algoritmo interpretava o número de variáveis inseridas e calculava a quantidade de setores da empresa. Na sequência, definiu-se o espaçamento de dois metros entre os setores, exceto para o setore de impressão que necessitava de uma distância de dez metros devido ao risco de explosão por gases inflamáveis. Quanto aos portões de entrada e saídas, estes foram distribuídos conforme o processo produtivo atual, onde 0.00 representava um canto do setor e 1.00 correspondia a uma volta completa no mesmo. Por fim, definiu-se a área total da fábrica, o espaço no qual os setores deveriam ser alocados pelo algoritmo PSO.

Definidos os tamanhos dos setores, o espaçamento dos corredores, os portões de entrada e saída e a área disponível para alocação das áreas produtivas, procedeu-se com o planejamento do fluxo produtivo. Inicialmente analisaram-se as características do processo produtivo da empresa, onde estas foram levantadas pelo fluxo de materiais, Tabela 2; ou seja, a quantidade de material enviado de uma setor para o outro. Estes dados foram transcritos como matriz para a função modelo do Matlab. A porcentagem de material enviado representava as prioridades de aproximação entre setores de acordo com o fluxo de produção. Em resumo, o fluxo de produção foi definido de acordo com a quantidade de material (kg) enviado de um setor para outro.

Com a função modelo estruturada, deu-se início a definição dos, critério de parada, tamanho da população e parâmetros do PSO. Após definir os parâmetros de funcionamento do PSO, é possível iniciar a simulação, onde as partículas são inicializadas em posições escolhidas aleatoriamente e movimentadas dentro do espaço disponível. A cada iteração do algoritmo, a qualidade da posição de cada partícula é julgada e atualizada para uma melhor posição, se houver. Com estas definições, o algoritmo gera a melhor proposta de leiaute. Por fim, o algoritmo plota a solução e apresenta a redução do custo ao longo da simulação (valor fornecido pelo Matlab).

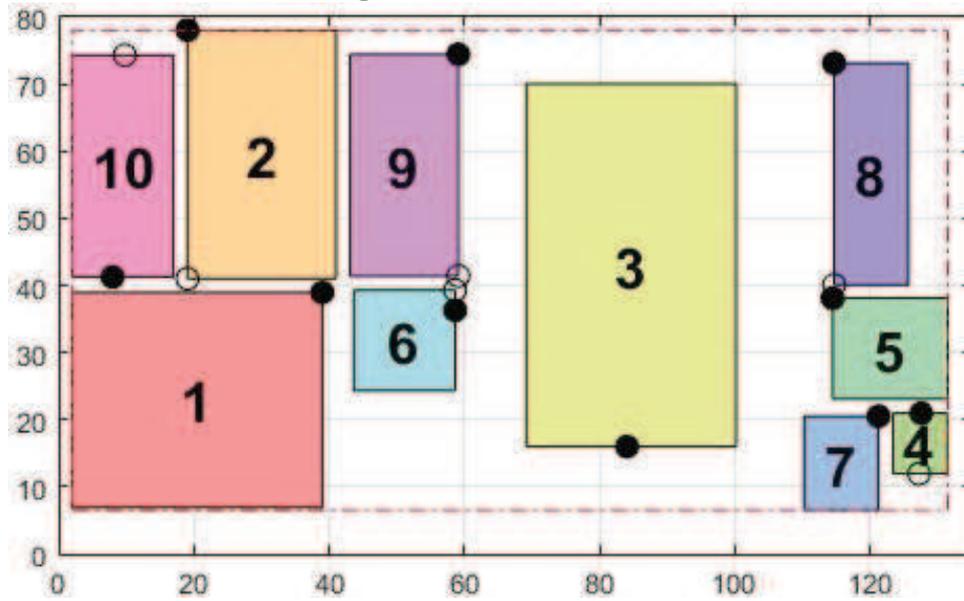
Após estruturado o algoritmo PSO, deu-se início à fase de testes e validação do mesmo. O objetivo destas simulações visava verificar a qualidade das alternativas geradas pelo algoritmo. Constatando que estas estavam conformes, procedeu-se com as simulações para o fornecimento das propostas de leiautes. Destas simulações, cinco propostas de leiautes foram consideradas aceitáveis; conforme a "*Flag*" *Feasible*, fornecida pelo algoritmo, e avaliação do alinhamento com as expectativas da empresa em questão. As Figuras 10, 11, 12, 13 e 14 representam estas propostas.

Figura 10: Leiaute 1 - PSO



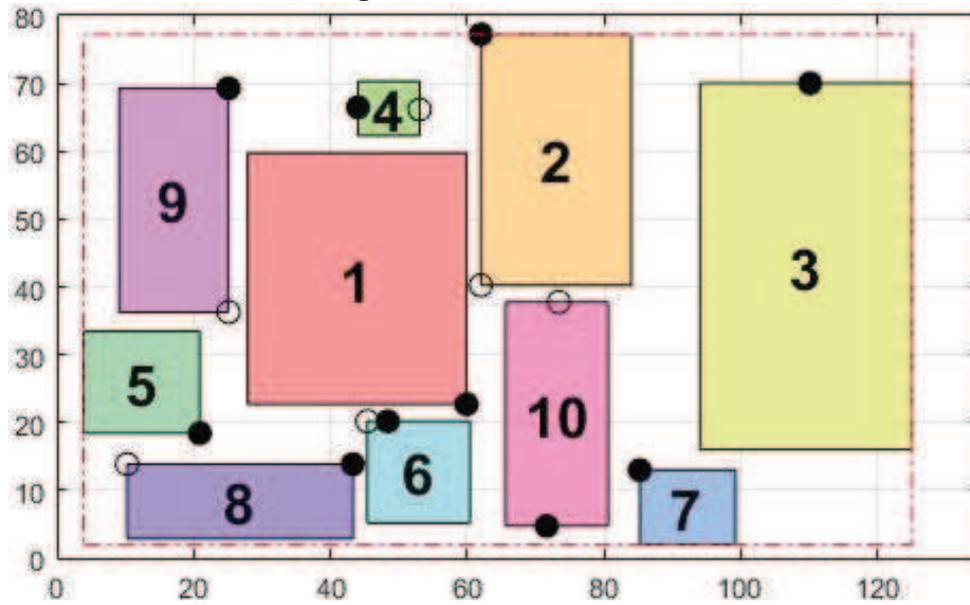
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11: Leiaute 2 - PSO



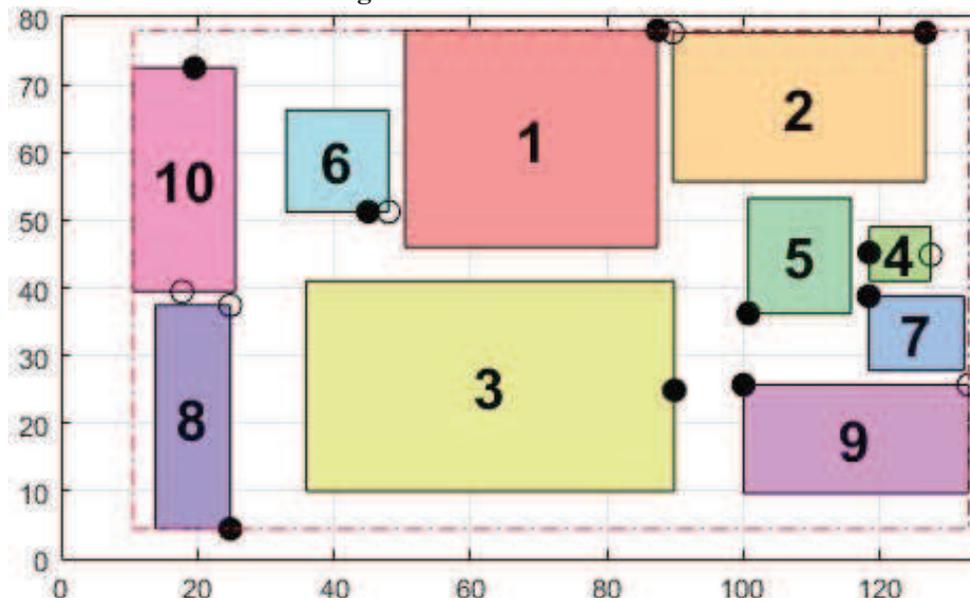
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12: Leiaute 3 - PSO



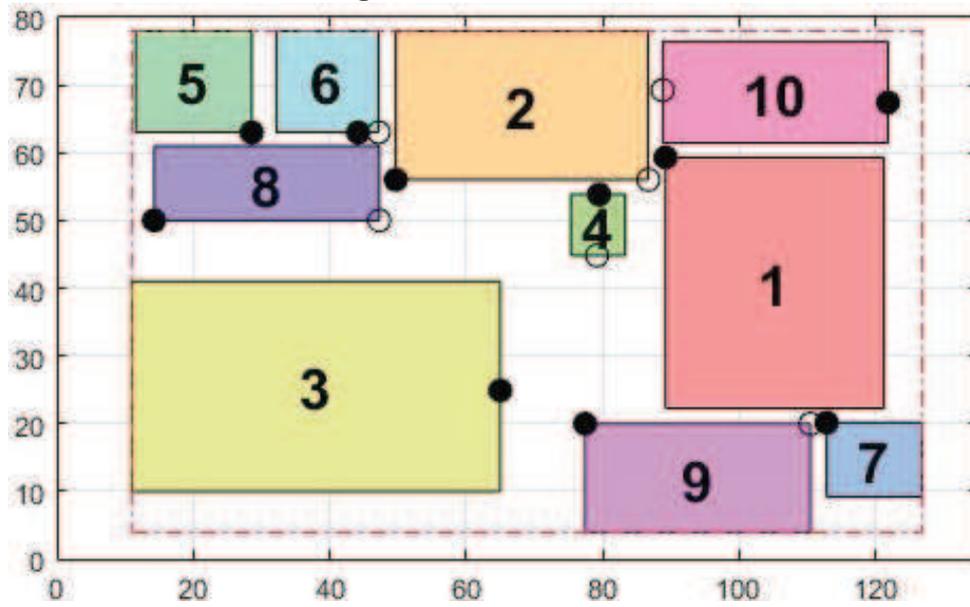
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13: Leiaute 4 - PSO



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14: Leiaute 5 - PSO



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 Análise das propostas de leiautes

Elaboradas as propostas de leiautes, faz-se necessário uma análise crítica de cada uma das propostas de acordo com o método de planejamento. A análise crítica visa averiguar a consistência de cada proposta e como estas estão associadas com o processo da empresa, sendo efetuada em conjunto com os gestores/supervisores da empresa em análise. Desta maneira, comentando sobre cada aspecto de cada proposta de leiaute.

No planejamento pelo *Systematic Layout Planning* (SLP), a alocação iniciou-se pelo setor de Extrusão, pois este já se encontrava instalado na nova unidade da empresa, o qual não é possível ser realocado devido à sua estrutura e maquinário que possui. Quanto as cinco propostas de leiautes, todas respeitaram a alocação A, E, I, O, U e X para a adjacência de setores. Desta maneira os demais foram alocados em seu entorno. As propostas de leiautes foram distribuídas de acordo com o fluxo de produção e avaliadas pela redução da distância entre os centroides dos setores. A Tabela 5 apresenta esses valores.

**Tabela 5:** Distância (m) entre centroides - SLP

Leiaute 1_SLP	464
Leiaute 2_SLP	428
Leiaute 3_SLP	468
Leiaute 4_SLP	377
Leiaute 5_SLP	697

Analisando uma a uma as propostas de leiautes fornecidas pelo SLP, percebe-se a melhor redução de distâncias entre os centroides dos setores, devido ao fato de respeitar as adjacências conforme o fluxo de produção. O leiaute 5, planejado pelos gestores da empresa, é o que apresenta a maior distância percorrida pelos materiais, isso se dá pelo fato do almoxarifado estar muito distante dos demais setores, e até mesmo alguns casos de *bypassing* ou *backtracking*. Os leiautes 1 e 3 apresentaram valores aproximados quanto à distância entre os centroides, porém são propostas bem distintas umas das outras. O leiaute 2 obteve a segunda menor distância entre centroides, porém o mesmo é o que necessita de uma maior extensão de área, devido à alocação do setor de impressão para atender critérios de adjacência. Por fim, referente ao leiaute 4, este foi o que apresentou a menor distância percorrida entre os setores, porém manteve a necessidade de uma extensão maior de área, mas inferior ao anterior.

Quanto ao planejamento pelo *Particle Swarm Optimization* (PSO), as propostas de leiautes foram distribuídas pelo algoritmo visando reduzir a distância percorrida entre os centroides dos setores. Porém, destaca-se, que neste foram utilizadas variáveis de fluxo produtivo, tamanho dos setores, espaçamento para corredores, portões de entrada/saída e área fabril. A distribuição dos setores foi aleatória e respeitou os critérios e a função objetivo do algoritmo. Para comparação com as propostas de leiautes do SLP, inclusive entre as do PSO, a Tabela 6 apresenta as distâncias entre centroides destas.

**Tabela 6:** Distância (m) entre centroides - PSO

Leiaute 1_PSO	748
Leiaute 2_PSO	799
Leiaute 3_PSO	713
Leiaute 4_PSO	861
Leiaute 5_PSO	680

Comparando as propostas de leiautes fornecidas pelo PSO em relação ao SLP, percebe-se que o leiaute 5 do PSO é o único que apresenta a menor distância entre uma das propostas do SLP, que é a número 5 também. Na sequência, temos as propostas de leiaute 3 e 1, respectivamente, com as menores distâncias do PSO. Percebe-se que a distribuição foi bastante aleatória e que de aspecto negativo, o setor de extrusão está centralizado na proposta de leiaute 3. Já as propostas de leiautes 2 e 4 são as maiores distâncias entre os centroides, devido à grande quantidade de *bypassing* e *backtracking*. Como vantagem, no PSO é possível desenvolver um número maior de propostas de leiautes, devido a aleatoriedade do algoritmo, o que diferencia do fator humano no planejamento. Porém este é prejudicado devido ao número pequeno de instâncias, menor do que quinze. Desta maneira espera-se que o PSO obtenha resultados melhores em empresas com um número elevado de setores, dificultando o planejamento pelo SLP.

#### 4.4 Seleção do leiaute pelo *Analytic Hierarchy Process*

Como esta pesquisa teve por objetivo utilizar dois métodos no planejamento de leiautes, *Systematic Leiaute Planning* e *Particle Swarm Optimization*, decidiu-se aplicar uma ferramenta de tomada de decisão multicritério para selecionar a melhor preposta. De acordo com a literatura, o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) apresentava as melhores características para o ranqueamento das melhores propostas de leiautes. Por se tratar de um método para planejamento de leiautes de pequenas e médias empresas, onde foram obtidos valores de uma empresa, optou-se por realizar duas simulações. A primeira simulação dizia respeito à empresa analisada, considerando-se os atributos/critérios da empresa. E a segunda simulação, utilizou os objetivos encontrados na literatura sobre *Facility Leiaute Planning* (FLP) simulados por meta-heurísticas nos últimos cinco anos; com o objetivo de generalizar o modelo. Em resumo, com esta análise de dados, fez-se possível apresentar um método aplicável em diferentes empresas de pequeno e médio porte.

A primeira simulação do AHP foi relacionada com os atributos/critérios da empresa em análise. As prioridades foram definidas em grupos focais, conforme as expectativas dos gestores e supervisores envolvidos diretamente com o processo de planejamento e as atividades produtivas. Sendo assim, foram definidos quatro critérios para as comparações por pares do método AHP: (i) atendimento às normas de Segurança, Saúde e Meio Ambiente (SSMA) e Boas Práticas de Fabricação (BPF); (ii) minimizar o manuseio de materiais; (iii) minimizar a distância entre setores; e, (iv) redução da área fabril. Por fim, compararam-se as propostas de leiautes.

Quanto ao atendimento às normas de SSMA e BPF, procurou-se analisar as propostas que apresentassem o menor número de *bypassing* e *backtracking*, ou seja, uma proposta que possuísse um fluxo de produção sem sobreposições. Para minimizar o manuseio de materiais, somaram-se as principais rotas percorridas pelos materiais dentro do processo produtivo; a distância foi medida entre os centroides dos setores, visto que é possível remanejar os portões de entrada e saída. Já a distância entre setores, envolveu o somatório de todos trajetos possíveis de acordo com as porcentagens do fluxo de produção; a distância também foi medida pelos centroides das áreas produtivas. Por fim, a redução da área fabril analisou as medidas da relação de largura pelo comprimento. Como tratava-se de um problema de minimização, as menores distâncias e medidas foram consideradas as melhores. Somente para o critério de atendimento às normas SSMA e BPF, efetuaram-se análises qualitativas.

Desta maneira, elaborou-se a Tabela 7 que apresenta o peso de cada critério, conforme definição em conjunto com os gestores da empresa em questão. A atribuição destes valores respeitou a escala fundamental de Saaty, método empregado em outras análises AHP. Na sequência estruturou-se a Tabela 8, os valores da mesma foram atribuídos respeitando os dados obtidos na Tabela 7. Após as comparações por pares entre os atributos/critérios da empresa, deu-se início à análise das propostas de leiautes. As Tabelas 9, 10, 11 e 12 apresentam as comparações por pares entre as propostas de leiautes de acordo com cada atributo/critério. Por fim, com os valores calculados, elaborou-se a Tabela 13 para ordenação das melhores propostas de leiaute.

**Tabela 7:** Escala de importância (Saaty) referente a empresa em análise

Abreviatura	Critério	Importância
Crit. 1	Atendimento às normas de SSMA e BPF (Fluxo)	9
Crit. 2	Minimizar o manuseio de materiais	7
Crit. 3	Minimizar a distância entre setores	3
Crit. 4	Redução da área fabril	1

**Tabela 8:** Comparações por pares entre os atributos/critérios - Empresa

	Crit. 1	Crit. 2	Crit. 3	Crit. 4	Prior.
Crit. 1	1	3	7	9	0,5739
Crit. 2	1/3	1	5	7	0,2913
Crit. 3	1/7	1/5	1	3	0,0903
Crit. 4	1/9	1/7	1/3	1	0,0445
SOMA	1,59	4,34	13,33	20,00	

**Tabela 9:** Comparações por pares, critério: atendimento às normas de SSMA e BPF - Empresa

	L.1_SLP	L.2_SLP	L.3_SLP	L.4_SLP	L.5_SLP	L.1_PSO	L.2_PSO	L.3_PSO	L.4_PSO	L.5_PSO	Priorização
L.1_SLP	1	4	3	1/2	2	8	8	6	7	5	0,3931
L.2_SLP	1/4	1	1/2	1/5	1/3	5	5	3	4	2	0,1523
L.3_SLP	1/3	2	1	1/4	1/2	6	6	4	5	3	0,2118
L.4_SLP	2	5	4	1	3	9	9	7	8	6	0,5398
L.5_SLP	1/2	3	2	1/3	1	7	7	5	6	4	0,2897
L.1_PSO	1/8	1/5	1/6	1/9	1/7	1	1	1/3	1/2	1/4	0,0357
L.2_PSO	1/8	1/5	1/6	1/9	1/7	1	1	1/3	1/2	1/4	0,0357
L.3_PSO	1/6	1/3	1/4	1/7	1/5	3	3	1	2	1/2	0,0756
L.4_PSO	1/7	1/4	1/5	1/8	1/6	2	2	1/2	1	1/3	0,0521
L.5_PSO	1/5	1/2	1/3	1/6	1/4	4	4	2	3	1	0,1081
SOMA	4,84	16,48	11,62	2,94	7,74	46,00	46,00	29,17	37,00	22,33	

**Tabela 10:** Comparações por pares, critério: minimizar o manuseio de materiais - Empresa

	L.1_SLP	L.2_SLP	L.3_SLP	L.4_SLP	L.5_SLP	L.1_PSO	L.2_PSO	L.3_PSO	L.4_PSO	L.5_PSO	Priorização
L.1_SLP	1	1/2	1	1/3	6	5	7	4	6	3	0,2831
L.2_SLP	2	1	2	1/2	7	6	8	5	7	4	0,4035
L.3_SLP	1	1/2	1	1/3	6	5	7	4	6	3	0,2831
L.4_SLP	3	2	3	1	8	7	9	6	8	5	0,5657
L.5_SLP	1/6	1/7	1/6	1/8	1	1/2	2	1/3	1	1/4	0,0497
L.1_PSO	1/5	1/6	1/5	1/7	2	1	3	1/2	2	1/3	0,0737
L.2_PSO	1/7	1/8	1/7	1/9	1/2	1/3	1	1/4	1/2	1/5	0,0352
L.3_PSO	1/4	1/5	1/4	1/6	3	2	4	1	3	1/2	0,1063
L.4_PSO	1/6	1/7	1/6	1/8	1	1/2	2	1/3	1	1/4	0,0497
L.5_PSO	1/3	1/4	1/3	1/5	4	3	5	2	4	1	0,1499
SOMA	8,26	5,03	8,26	3,04	38,50	30,33	48,00	23,42	38,50	17,53	

**Tabela 11:** Comparações por pares, critério: minimizar a distância entre setores - Empresa

	L.1_SLP	L.2_SLP	L.3_SLP	L.4_SLP	L.5_SLP	L.1_PSO	L.2_PSO	L.3_PSO	L.4_PSO	L.5_PSO	Priorização
L.1_SLP	1	1/2	1	1/3	3	5	6	4	7	3	0,2727
L.2_SLP	2	1	2	1/2	4	6	7	5	8	4	0,3951
L.3_SLP	1	1/2	1	1/3	3	5	6	4	7	3	0,2727
L.4_SLP	3	2	3	1	5	7	8	6	9	5	0,5583
L.5_SLP	1/3	1/4	1/3	1/5	1	3	4	2	5	1	0,1334
L.1_PSO	1/5	1/6	1/5	1/7	1/3	1	2	1/2	3	1/3	0,0639
L.2_PSO	1/6	1/7	1/6	1/8	1/4	1/2	1	1/3	2	1/4	0,0453
L.3_PSO	1/4	1/5	1/4	1/6	1/2	2	3	1	4	1/2	0,0916
L.4_PSO	1/7	1/8	1/7	1/9	1/5	1/3	1/2	1/4	1	1/5	0,0335
L.5_PSO	1/3	1/4	1/3	1/5	1	3	4	2	5	1	0,1334
SOMA	8,43	5,13	8,43	3,11	18,28	32,83	41,50	25,08	51,00	18,28	

**Tabela 12:** Comparações por pares, critério: redução da área fabril - Empresa

	L.1_SLP	L.2_SLP	L.3_SLP	L.4_SLP	L.5_SLP	L.1_PSO	L.2_PSO	L.3_PSO	L.4_PSO	L.5_PSO	Priorização
L.1_SLP	1	4	2	3	9	7	5	5	6	5	0,5704
L.2_SLP	1/4	1	1/3	1/2	6	4	2	2	3	2	0,1937
L.3_SLP	1/2	3	1	2	8	6	4	4	5	4	0,4071
L.4_SLP	1/3	2	1/2	1	7	5	3	3	4	3	0,2850
L.5_SLP	1/9	1/6	1/8	1/7	1	1/3	1/5	1/5	1/4	1/5	0,0326
L.1_PSO	1/7	1/4	1/6	1/5	3	1	1/3	1/3	1/2	1/3	0,0569
L.2_PSO	1/5	1/2	1/4	1/3	5	3	1	1	2	1	0,1243
L.3_PSO	1/5	1/2	1/4	1/3	5	3	1	1	2	1	0,1243
L.4_PSO	1/6	1/3	1/5	1/4	4	2	1/2	1/2	1	1/2	0,0814
L.5_PSO	1/5	1/2	1/4	1/3	5	3	1	1	2	1	0,1243
SOMA	3,10	12,25	5,08	8,09	53,00	34,33	18,03	18,03	25,75	18,03	

**Tabela 13:** Ordenação das melhores propostas de leiaute - Empresa

	Crit. 1	Crit. 2	Crit. 3	Crit. 4	Classif.
L.1_SLP	0,3931	0,2831	0,2727	0,5704	0,3581
L.2_SLP	0,1523	0,4035	0,3951	0,1937	0,2492
L.3_SLP	0,2118	0,2831	0,2727	0,4071	0,2468
L.4_SLP	0,5398	0,5657	0,5583	0,2850	0,5377
L.5_SLP	0,2897	0,0497	0,1334	0,0326	0,1942
L.1_PSO	0,0357	0,0737	0,0639	0,0569	0,0502
L.2_PSO	0,0357	0,0352	0,0453	0,1243	0,0403
L.3_PSO	0,0756	0,1063	0,0916	0,1243	0,0882
L.4_PSO	0,0521	0,0497	0,0335	0,0814	0,0510
L.5_PSO	0,1081	0,1499	0,1334	0,1243	0,1233
Pond.	0,5739	0,2913	0,0903	0,0445	

Com estes valores, constatou-se que as propostas de leiautes fornecidas pelo SLP atendiam melhor as necessidades da empresa em estudo, em relação ao PSO. Sendo assim, os cinco melhores leiautes eram: L.4\_SLP, L.1\_SLP, L.2\_SLP, L.3\_SLP e L.5\_SLP, respectivamente. Ressaltando que a proposta de leiaute número 5 (SLP) é referente à planejada pela empresa. Desta maneira, percebe-se que o Leiaute L.5\_PSO, aproximou-se da proposta da empresa, podendo ser considerado como resultado satisfatório. As demais propostas de leiaute fornecidas pelo PSO não apresentaram resultado satisfatório para este caso.

A segunda simulação pelo método AHP utilizou os objetivos/critérios para o *Facility Leiaute Problem* (FLP) encontrados na literatura. Estes objetivos buscavam minimizar: (i) a distância entre máquinas/setores; (ii) o custo de manuseio de materiais; (iii) o custo de rearranjo; (iv) o custo do espaço; e, (v) o fluxo de material. Estes objetivos foram priorizados de acordo com o número de aplicações nas literaturas dos últimos cinco anos para meta-heurísticas, respeitando os valores da escala de Saaty.

Para minimizar a distância entre máquinas/setores, calculou-se a distância entre os centros das áreas produtivas, de acordo com a porcentagem de material enviado entre eles. Ou seja, foram consideradas todas as atividades que enviam material entre si. E a minimização do custo de manuseio de materiais, fez-se similar à anterior, porém neste objetivo foram consideradas as principais atividades do processo produtivo. Quanto ao custo de rearranjo, analisou-se em conjunto com os gestores as propostas de leiautes que melhor atendiam as expectativas da empresa, os valores foram atribuídos conforme a escala de Saaty. Já, para a minimização do espaço, calcularam-se as áreas das propostas de leiautes pela relação da largura com o comprimento do setor. Por fim, o fluxo de material foi avaliado conforme o *bypassing* e o *backtracking*, ou seja, não deveria haver sobreposições de atividades.

Desta maneira, elaborou-se a Tabela 14 para atribuir o peso de cada critério, conforme escala de Saaty. Estes valores respeitaram o número de aplicações dos objetivos constatados nas literaturas dos últimos cinco anos para meta-heurísticas referente ao FLP. A Tabela 15 represen-

tou a comparação por pares dos objetivos levantados da literatura. Esta comparação foi efetuada conforme os pesos atribuídos na Tabela 14. Na sequência, as propostas de leiautes foram comparadas em pares de acordo com cada objetivo/critério (Tabelas 16, 17, 18, 19 e 20). Os valores destas representaram os objetivos de minimização encontrados na literatura. Desta maneira, foram considerados os menores valores como os de maior importância. E para a análise do fluxo e rearranjo, analisou-se qualitativamente em conjunto com os gestores da empresa em estudo. Por fim, a Tabela 21 apresentou a ordenação das melhores propostas de leiautes.

**Tabela 14:** Escala de importância (Saaty) referente aos objetivos da literatura para FLP

Abreviatura	Critério	Importância
Crit. 1	Minimizar a distância entre setores	6
Crit. 2	Minimizar o custo de manuseio de materiais	9
Crit. 3	Minimizar o custo de rearranjo	5
Crit. 4	Minimizar o custo do espaço	3
Crit. 5	Minimizar o fluxo de material	1

**Tabela 15:** Comparações por pares entre os atributos/critérios - Literatura FLP

	Crit. 1	Crit. 2	Crit. 3	Crit. 4	Crit. 5	Prior.
Crit. 1	1	1/4	2	4	6	0,2652
Crit. 2	4	1	5	7	9	0,6701
Crit. 3	1/2	1/5	1	3	5	0,1808
Crit. 4	1/4	1/7	1/3	1	3	0,0888
Crit. 5	1/6	1/9	1/5	1/3	1	0,0451
SOMA	5,92	1,70	8,53	15,33	24,00	

**Tabela 16:** Comparações por pares, critério: minimizar distância entre setores - Literatura FLP

	L.1_SLP	L.2_SLP	L.3_SLP	L.4_SLP	L.5_SLP	L.1_PSO	L.2_PSO	L.3_PSO	L.4_PSO	L.5_PSO	Priorização
L.1_SLP	1	1/2	1	1/3	3	5	6	4	7	3	0,3568
L.2_SLP	2	1	2	1/2	4	6	7	5	8	4	0,5071
L.3_SLP	1	1/2	1	1/3	3	5	6	4	7	3	0,3568
L.4_SLP	3	2	3	1	5	7	8	6	9	5	0,6984
L.5_SLP	1/3	1/4	1/3	1/5	1	3	4	2	5	1	0,1614
L.1_PSO	1/5	1/6	1/5	1/7	1/3	1	2	1/2	3	1/3	0,0733
L.2_PSO	1/6	1/7	1/6	1/8	1/4	1/2	1	1/3	2	1/4	0,0523
L.3_PSO	1/4	1/5	1/4	1/6	1/2	2	3	1	4	1/2	0,1056
L.4_PSO	1/7	1/8	1/7	1/9	1/5	1/3	1/2	1/4	1	1/5	0,0391
L.5_PSO	1/3	1/4	1/3	1/5	1	3	4	2	5	1	0,1614
SOMA	8,43	5,13	8,43	3,11	18,28	32,83	41,50	25,08	51,00	18,28	

**Tabela 17:** Comparações por pares, critério: minimizar custo de manuseio de materiais - Literatura FLP

	L.1_SLP	L.2_SLP	L.3_SLP	L.4_SLP	L.5_SLP	L.1_PSO	L.2_PSO	L.3_PSO	L.4_PSO	L.5_PSO	Priorização
L.1_SLP	1	1/2	1	1/3	6	5	7	4	6	3	0,2831
L.2_SLP	2	1	2	1/2	7	6	8	5	7	4	0,4035
L.3_SLP	1	1/2	1	1/3	6	5	7	4	6	3	0,2831
L.4_SLP	3	2	3	1	8	7	9	6	8	5	0,5657
L.5_SLP	1/6	1/7	1/6	1/8	1	1/2	2	1/3	1	1/4	0,0497
L.1_PSO	1/5	1/6	1/5	1/7	2	1	3	1/2	2	1/3	0,0737
L.2_PSO	1/7	1/8	1/7	1/9	1/2	1/3	1	1/4	1/2	1/5	0,0352
L.3_PSO	1/4	1/5	1/4	1/6	3	2	4	1	3	1/2	0,1063
L.4_PSO	1/6	1/7	1/6	1/8	1	1/2	2	1/3	1	1/4	0,0497
L.5_PSO	1/3	1/4	1/3	1/5	4	3	5	2	4	1	0,1499
SOMA	8,26	5,03	8,26	3,04	38,50	30,33	48,00	23,42	38,50	17,53	

**Tabela 18:** Comparações por pares, critério: minimizar o custo de rearranjo - Literatura FLP

	L.1_SLP	L.2_SLP	L.3_SLP	L.4_SLP	L.5_SLP	L.1_PSO	L.2_PSO	L.3_PSO	L.4_PSO	L.5_PSO	Priorização
L.1_SLP	1	2	1/3	1/3	1	6	7	4	5	3	0,2476
L.2_SLP	1/2	1	1/4	1/4	1/2	5	6	3	4	2	0,1725
L.3_SLP	3	4	1	1	3	8	9	6	7	5	0,4942
L.4_SLP	3	4	1	1	3	8	9	6	7	5	0,4942
L.5_SLP	1	2	1/3	1/3	1	6	7	4	5	3	0,2476
L.1_PSO	1/6	1/5	1/8	1/8	1/6	1	2	1/3	1/2	1/4	0,0433
L.2_PSO	1/7	1/6	1/9	1/9	1/7	1/2	1	1/4	1/3	1/5	0,0322
L.3_PSO	1/4	1/3	1/6	1/6	1/4	3	4	1	2	1/2	0,0859
L.4_PSO	1/5	1/4	1/7	1/7	1/5	2	3	1/2	1	1/3	0,0606
L.5_PSO	1/3	1/2	1/5	1/5	1/3	4	5	2	3	1	0,1218
SOMA	9,59	14,45	3,66	3,66	9,59	43,50	53,00	27,08	34,83	20,28	

**Tabela 19:** Comparações por pares, critério: minimizar o custo do espaço - Literatura FLP

	L.1_SLP	L.2_SLP	L.3_SLP	L.4_SLP	L.5_SLP	L.1_PSO	L.2_PSO	L.3_PSO	L.4_PSO	L.5_PSO	Priorização
L.1_SLP	1	4	2	3	9	7	5	6	5	5	0,5704
L.2_SLP	1/4	1	1/3	1/2	6	4	2	2	3	2	0,1937
L.3_SLP	1/2	3	1	2	8	6	4	4	5	4	0,4071
L.4_SLP	1/3	2	1/2	1	7	5	3	3	4	3	0,2850
L.5_SLP	1/9	1/6	1/8	1/7	1	1/3	1/5	1/5	1/4	1/5	0,0326
L.1_PSO	1/7	1/4	1/6	1/5	3	1	1/3	1/3	1/2	1/3	0,0569
L.2_PSO	1/5	1/2	1/4	1/3	5	3	1	1	2	1	0,1243
L.3_PSO	1/5	1/2	1/4	1/3	5	3	1	1	2	1	0,1243
L.4_PSO	1/6	1/3	1/5	1/4	4	2	1/2	1/2	1	1/2	0,0814
L.5_PSO	1/5	1/2	1/4	1/3	5	3	1	1	2	1	0,1243
SOMA	3,10	12,25	5,08	8,09	53,00	34,33	18,03	18,03	25,75	18,03	

**Tabela 20:** Comparações por pares, critério: minimizar o fluxo de material - Literatura FLP

	L.1_SLP	L.2_SLP	L.3_SLP	L.4_SLP	L.5_SLP	L.1_PSO	L.2_PSO	L.3_PSO	L.4_PSO	L.5_PSO	Priorização
L.1_SLP	1	4	3	1/2	2	8	8	6	7	5	0,4205
L.2_SLP	1/4	1	1/2	1/5	1/3	5	5	3	4	2	0,1569
L.3_SLP	1/3	2	1	1/4	1/2	6	6	4	5	3	0,2187
L.4_SLP	2	5	4	1	3	9	9	7	8	6	0,5810
L.5_SLP	1/2	3	2	1/3	1	7	7	5	6	4	0,3034
L.1_PSO	1/8	1/5	1/6	1/9	1/7	1	1	1/3	1/2	1/4	0,0376
L.2_PSO	1/8	1/5	1/6	1/9	1/7	1	1	1/3	1/2	1/4	0,0376
L.3_PSO	1/6	1/3	1/4	1/7	1/5	3	3	1	2	1/2	0,0784
L.4_PSO	1/7	1/4	1/5	1/8	1/6	2	2	1/2	1	1/3	0,0544
L.5_PSO	1/5	1/2	1/3	1/6	1/4	4	4	2	3	1	0,1115
SOMA	4,84	16,48	11,62	2,94	7,74	46,00	46,00	29,17	37,00	22,33	

**Tabela 21:** Ordenação das melhores propostas de leiaute - Literatura

	Crit. 1	Crit. 2	Crit. 3	Crit. 4	Crit. 5	Classif.
L.1_SLP	0,3568	0,2831	0,2476	0,5704	0,4205	0,3987
L.2_SLP	0,5071	0,4035	0,1725	0,1937	0,1569	0,4604
L.3_SLP	0,3568	0,2831	0,4942	0,4071	0,2187	0,4197
L.4_SLP	0,6984	0,5657	0,4942	0,2850	0,5810	0,7052
L.5_SLP	0,1614	0,0497	0,2476	0,0326	0,3034	0,1375
L.1_PSO	0,0733	0,0737	0,0433	0,0569	0,0376	0,0834
L.2_PSO	0,0523	0,0352	0,0322	0,1243	0,0376	0,0560
L.3_PSO	0,1056	0,1063	0,0859	0,1243	0,0784	0,1294
L.4_PSO	0,0391	0,0497	0,0606	0,0814	0,0544	0,0643
L.5_PSO	0,1614	0,1499	0,1218	0,1243	0,1115	0,1814
Ponder.	0,2652	0,6701	0,1808	0,0888	0,0451	

Os dados da Tabela 21 mostram que o leiaute 4, planejado pelo SLP, é novamente a melhor proposta. Seguido pelos leiautes 2, 3 e 1, planejados pelo SLP, e 5, simulado pelo PSO. Tem-se aqui a primeira aparição de uma proposta de leiaute fornecida pelo PSO entre as 5 melhores. Nesta rodada, a proposta planejada pela empresa está de fora das cinco melhores. Nas duas simulações do AHP, pode-se constatar que as propostas de leiautes planejadas no SLP são mais satisfatórias; porém não descartam-se os resultados obtidos no PSO.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento de leiautes envolve a alocação de instalações dentro de uma área fabril. Mas não só alocação de setores, como também a distribuição de máquinas e pessoas, identificação de portões de entrada e saída, definição do fluxo de materiais e informações, redução de estoques em processo e uso adequado do espaço existente. Para tanto, esta pesquisa identificou objetivos/critérios, na literatura, que pudessem ser aplicados em empresas de pequeno e médio porte, tendo sido apresentados dois métodos, distintos, para o planejamento de leiautes.

A primeira parte desta pesquisa envolveu o levantamento teórico sobre métodos para planejamento de leiautes. O primeiro objetivo específico tratava da identificação de estratégias utilizadas em trabalhos aplicados da literatura para o planejamento de leiaute. Esta identificação considerava encontrar ferramentas de menor complexidade, ou seja, de fácil aplicação pelos gestores das pequenas e médias empresas e outras mais robustas, porém de maior complexidade. A segunda etapa tinha como objetivo a escolha, entre os modelos identificados na literatura, aqueles que apresentassem melhores condições de atuar em empresas de pequeno e médio porte. A escolha se baseava na definição de dois modelos para o planejamento de leiautes. O primeiro método selecionado foi o *Systematic Layout Planning* (SLP), ferramenta bem difundida na literatura e de fácil aplicação em diferentes tipos de empresas. O segundo método selecionado foi o *Particle Swarm Optimization* (PSO), meta-heurística sugerida em pesquisas publicadas recentemente em periódicos qualificados. Por fim, para decisão da melhor proposta de leiaute fornecida pelos dois métodos, seguiu-se para a avaliação e seleção de uma ferramenta de tomada de decisão. A terceira etapa avaliou os resultados da aplicação das ferramentas por meio de um modelo de análise de decisão multicriterial. A definição da ferramenta multicriterial considerou, novamente, os resultados da literatura. Foram identificadas aplicações de métodos multicriteriais, inclusive no próprio SLP. Sendo assim, optou-se um utilizar o *Analytic Hierarchy Process* (AHP). O AHP foi utilizado como ferramenta de ordenação das propostas de leiautes, apresentando aquela que melhor atende as expectativas da empresa.

Foram elaboradas cinco propostas pelo método SLP, onde uma foi desenvolvida pelos gestores da empresa em questão, e cinco pelo PSO. Com as propostas estabelecidas, definiram-se os critérios para seleção pelo método AHP. Foram consideradas duas análises, a primeira utilizava os critérios de uma empresa e a segunda os objetivos no planejamento de leiautes, conforme pesquisa bibliográfica. A estratégia de efetuar duas análises, tinha como objetivo demonstrar a generalidade do método proposto. Após comparações por pares dos critérios e das propostas de leiautes, no método AHP, ordenaram-se os melhores resultados. As propostas de leiautes fornecidas pelo SLP demonstraram melhor aceitação que o PSO, visto que este atendia melhor a adjacência entre setores, pois o SLP respeita a alocação de acordo com o fluxo de material e com os códigos de importância da matriz de relacionamento, enquanto que o PSO tem uma distribuição aleatória, o que proporciona maior variabilidade nas propostas de leiautes.

Do ponto de vista teórico, esta pesquisa contribuiu com a comparação entre dois méto-

dos distintos para o planejamento de leiautes. O primeiro método utilizou uma ferramenta para planejamento de leiautes que está difundida na literatura por mais de cinquenta anos, o *Systematic Layout Planning* (SLP). O segundo método considerou a aplicação de uma ferramenta mais robusta e recente, neste caso, a meta-heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO). Optou-se por estes dois métodos uma vez que foi sugerido na literatura a comparação por algoritmos/heurísticas/meta-heurísticas e relatos recentes indicavam a utilização do PSO neste contexto. Sendo assim, compararam-se os resultados obtidos por estes dois métodos. Para comparação, necessitou-se de uma ferramenta de tomada de decisão, frente a necessidade de comparações com as características de cada. O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) comparou, por pares, os critérios demandados pela empresa e as instâncias da literatura; devido à necessidade de generalizar o modelo para empresas de pequeno e médio porte. Planejadas as propostas de leiautes e selecionadas as melhores pelo AHP, identificou-se que para pequenas instâncias o método SLP é melhor que o PSO; devido à facilidade de planejamento. Porém quanto ao tempo este demonstrou-se bastante dispendioso. Em resumo, os resultados demonstraram que para pequenas e médias empresas, com número reduzido de setores, o SLP leva certa vantagem, porém, para grandes instâncias, o PSO se torna mais eficaz.

Economicamente, este trabalho contribuiu com ferramentas que auxiliam no planejamento das propostas de leiautes e no processo de tomada de decisão. Um planejamento eficaz de leiaute garante a redução de custos com movimentação desnecessária de materiais, replanejamentos da planta fabril e otimização do espaço utilizado. Por mais que esta pesquisa não tenha apresentado valores monetários referentes à redução de custos, este é deduzido pela otimização do fluxo produtivo, ou seja, a pesquisa reduziu a distância percorrida pelo material e a área total da nova fábrica da empresa em estudo.

Gerencialmente, esta pesquisa contribuiu com o estudo de métodos para planejamento de leiautes e para a tomada de decisões. Como expectativa, esperava-se que os gerentes, de empresas de pequeno e médio porte, conseguissem empregar pelo menos um destes dois métodos para o planejamento de leiautes. Desta maneira, estes optaram em utilizar o SLP, devido à sua facilidade de aplicação, permitindo a participação de todos os responsáveis pelas atividades do processo produtivo. Inclusive, uma das propostas de leiaute planejada pela empresa, foi comparada com as demais pelo método AHP. Por fim, além de fornecer dois métodos para o planejamento de leiautes, os gestores perceberam no AHP a possibilidade de aplicá-lo em outras atividades que demandassem tomar decisões frente à múltiplos critérios. Quanto à utilização destes dois métodos por gestores de pequenas e médias empresas, sugere-se o SLP para pequenas instâncias, número reduzido de setores, enquanto que para grandes instâncias, recomenda-se a adoção do PSO. A definição de pequenas ou grandes instâncias não diz respeito à empresa ser de pequeno ou médio porte, mas ao número de setores que ela possui. Pode-se sugerir como número reduzido de setores um quantitativo inferior a quinze.

Referente ao tempo de planejamento, o SLP demanda maior tempo e outras ferramentas auxiliares para definição da melhor proposta. Já o PSO fornece o melhor leiaute sem uma

ferramenta de suporte e é simulado no próprio algoritmo. A simulação no PSO é mais rápida que no SLP, pois, após estruturação do modelo do algoritmo, basta iniciar a simulação e em questão de poucos minutos tem-se o resultado (a duração depende do critério de parada). Já no SLP, é necessário uma nova estruturação para cada tipo de empresa, ou alteração no processo produtivo da mesma. A inserção do PSO, ou outra heurística/meta-heurística, no SLP seria a melhor solução para a questão de instâncias e aplicabilidade em empresas de pequeno e médio porte. O SLP seria utilizado para a estruturação do modelo e o PSO para o planejamento das propostas de leiautes. Desta maneira, pesquisas futuras poderiam desenvolver um algoritmo que utilizasse as características do SLP (proximidade entre setores de acordo com os códigos A, E, I, O, U e X) para estruturação do modelo e as heurísticas/meta-heurísticas para planejamento (não necessariamente o PSO). Pois o processo de elaboração do SLP transcende o diagrama de Muther, o que deveria ser levado em consideração pela heurística/metaheurística. Neste caso, espera-se o desenvolvimento de um algoritmo de menor complexidade (que facilite a aplicação por gestores de empresas), mais robusto e com menor tempo de simulação/planejamento.

Quanto à necessidade de replanejamento de leiautes, sugere-se a análise das propostas de leiaute (desenvolvidas pela lógica SLP) do ponto de vista da Teoria das Restrições (TOC - *Theory of Constraints*), ou seja, do gargalo. Desta maneira, com a TOC, conseqüentemente será reduzido o *lead-time* e otimizada a planta para que a mesma se mantenha inalterada (o leiaute) por períodos mais extensos. Inclusive, quanto ao replanejamento do leiaute, sugere-se a análise de modularização da planta fabril, visto a possibilidade de duplicar setores e aumentar a capacidade produtiva das empresas. Sendo assim, se a empresa tiver a possibilidade de passar de médio para grande porte, ou de pequeno para médio porte, poderá duplicar a sua capacidade produtiva mediante a modularização, duplicação de setores para elevar a capacidade produtiva. Contribuindo para reduzir as chances de replanejamento de uma planta fabril.

## REFERÊNCIAS

- AHMADI, A.; PISHVAEE, M. S.; JOKAR, M. R. A. A survey on multi-floor facility layout problems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 107, p. 158–170, 2017.
- AL-HAWARI, T.; MUMANI, A.; MOMANI, A. Application of the Analytic Network Process to facility layout selection. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, n. 4, p. 488–497, 2014.
- ALLAHYARI, M. Z.; AZAB, A. Facility Layout Problem for Cellular Manufacturing Systems. In: **Computational Optimization in Engineering-Paradigms and Applications**. InTech, 2017.
- ALVARENGA, A. G. de; NEGREIROS-GOMES, F. J. et al. Metaheuristic methods for a class of the facility layout problem. **Journal of intelligent manufacturing**, v. 11, n. 4, p. 421–430, 2000.
- BARTH, M. J. **Otimização multi-nível para projeto de redes híbridas (ópticas e sem fio) para implementação de cidades inteligentes**. 2016. Dissertação – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, RS, 2016.
- BAYKASOGLU, A.; DERELI, T.; SABUNCU, I. An ant colony algorithm for solving budget constrained and unconstrained dynamic facility layout problems. **Omega**, v. 34, n. 4, p. 385–396, 2006.
- BERSANI, C.; GUERISOLI, C.; MAZZINO, N.; SACILE, R.; SALLAK, M. A multi-criteria methodology to evaluate the optimal location of a multifunctional railway portal on the railway network. **Journal of Rail Transport Planning & Management**, v. 5, n. 2, p. 78–91, 2015.
- BESBES, M.; AFFONSO, R. C.; ZOLGHADRI, M.; MASMOUDI, F.; HADDAR, M. Multi-criteria decision making for the selection of a performant manual workshop layout: a case study. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 12404–12409, 2017.
- BLAND, J. Layout of facilities using an ant system approach. **Engineering optimization**, v. 32, n. 1, p. 101–115, 1999.
- CAMBRON, K. E.; EVANS, G. W. Layout design using the analytic hierarchy process. **Computers & industrial engineering**, v. 20, n. 2, p. 211–229, 1991.
- CHE, A.; ZHANG, Y.; FENG, J. Bi-objective optimization for multi-floor facility layout problem with fixed inner configuration and room adjacency constraints. **Computers & Industrial Engineering**, v. 105, p. 265–276, 2017.
- CHEN, G. Y.-H. A new data structure of solution representation in hybrid ant colony optimization for large dynamic facility layout problems. **International Journal of Production Economics**, v. 142, n. 2, p. 362–371, 2013.
- CHRAIBI, A.; KHARRAJA, S.; OSMAN, I. H.; ELBEQQALI, O. A particle swarm algorithm for solving the multi-objective operating theater layout problem. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 12, p. 1169–1174, 2016.

- DE CARLO, F.; ARLEO, M. A.; BORGIA, O.; TUCCI, M. Layout design for a low capacity manufacturing line: a case study. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 5, p. 35, 2013.
- DRIRA, A.; PIERREVAL, H.; HAJRI-GABOUJ, S. Facility layout problems: a survey. **Annual Reviews in Control**, v. 31, n. 2, p. 255–267, 2007.
- EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In: MHS'95. PROCEEDINGS OF THE SIXTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MICRO MACHINE AND HUMAN SCIENCE, 1995. **Anais...** 1995. p. 39–43.
- EROĞLU, Y.; SEÇKINER, S. U. Design of wind farm layout using ant colony algorithm. **Renewable Energy**, v. 44, p. 53–62, 2012.
- FAHAD, M.; NAQVI, S. A. A.; ATIR, M.; ZUBAIR, M.; SHEHZAD, M. M. Energy Management in a Manufacturing Industry through Layout Design. **Procedia Manufacturing**, v. 8, p. 168–174, 2017.
- FENG, H.; DA, W.; XI, L.; PAN, E.; XIA, T. Solving the integrated cell formation and worker assignment problem using particle swarm optimization and linear programming. **Computers & Industrial Engineering**, v. 110, p. 126–137, 2017.
- FRANCIS, R. L.; MCGINNIS, L. F.; WHITE, J. A. **Facility layout and location: an analytical approach**. 2. ed. Englewood Cliffs, N.J.:Prentice Hall, 1992.
- GARCÍA-HERNÁNDEZ, L.; PIERREVAL, H.; SALAS-MORERA, L.; ARAUZO-AZOFRA, A. Handling qualitative aspects in unequal area facility layout problem: an interactive genetic algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 13, n. 4, p. 1718–1727, 2013.
- GELDERMANN, J.; SCHÖBEL, A. On the similarities of some multi-criteria decision analysis methods. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 18, n. 3-4, p. 219–230, 2011.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo:Atlas, 2017.
- GONÇALVES, J. F.; RESENDE, M. G. A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, v. 246, n. 1, p. 86–107, 2015.
- HADI-VCHEH, A.; MOHAMADGHASEMI, A. An integrated AHP–NLP methodology for facility layout design. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 40–45, 2013.
- HAFIZ, F.; ABDENNOUR, A. Particle Swarm Algorithm variants for the Quadratic Assignment Problems-A probabilistic learning approach. **Expert Systems with Applications**, v. 44, p. 413–431, 2016.
- HAHN, B.; VALENTINE, D. T. **Essential MATLAB for engineers and scientists**. Academic Press, 2016.
- HAMMAD, A. W.; REY, D.; AKBARNEZHAD, A. A cutting plane algorithm for the site layout planning problem with travel barriers. **Computers & Operations Research**, v. 82, p. 36–51, 2017.

- HAMZHEEI, M.; FARAHANI, R. Z.; RASHIDI-BAJGAN, H. An ant colony-based algorithm for finding the shortest bidirectional path for automated guided vehicles in a block layout. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 64, p. 399–409, 2013.
- HANI, Y.; AMODEO, L.; YALAOUI, F.; CHEN, H. Ant colony optimization for solving an industrial layout problem. **European Journal of Operational Research**, v. 183, n. 2, p. 633–642, 2007.
- HERAGU, S. S.; KUSIAK, A. Efficient models for the facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, v. 53, n. 1, p. 1–13, 1991.
- HUANG, H.-H.; MAY, M.-D.; HUANG, H.-M.; HUANG, Y.-W. Multiple-floor facilities layout design. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SERVICE OPERATIONS AND LOGISTICS, AND INFORMATICS, 2010., 2010. **Proceedings...** 2010. p. 165–170.
- HUI, L.; SHI-YOU, Q. Systematic layout planning: a study on coal mine facilities. In: MANAGEMENT SCIENCE AND ENGINEERING (ICMSE), 2013 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2013. **Anais...** 2013. p. 1944–1949.
- HUNT, B. R.; LIPSMAN, R. L.; ROSENBERG, J. M. **A guide to MATLAB: for beginners and experienced users**. Cambridge University Press, 2014.
- IZADINIA, N.; ESHGHI, K. A robust mathematical model and ACO solution for multi-floor discrete layout problem with uncertain locations and demands. **Computers & Industrial Engineering**, v. 96, p. 237–248, 2016.
- JIA, Q.; SEO, Y. Solving resource-constrained project scheduling problems: conceptual validation of flp formulation and efficient permutation-based abc computation. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 8, p. 2037–2050, 2013.
- JIANG, S.; NEE, A. A novel facility layout planning and optimization methodology. **CIRP Annals**, v. 62, n. 1, p. 483 – 486, 2013.
- JOSEPH, T. P. Design a lean laboratory layout. **Medical Laboratory Observer**, v. 38, n. 2, p. 24, 2006.
- KANG, S.; CHAE, J. Harmony search for the layout design of an unequal area facility. **Expert Systems with Applications**, v. 79, p. 269–281, 2017.
- KAVEH, A.; TALATAHARI, S. Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures. **Computers & Structures**, v. 87, n. 5, p. 267–283, 2009.
- KULTUREL-KONAK, S. A Matheuristic Approach for Solving the Dynamic Facility Layout Problem. **Procedia Computer Science**, v. 108, p. 1374–1383, 2017.
- KULTUREL-KONAK, S.; KONAK, A. Unequal area flexible bay facility layout using ant colony optimisation. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 7, p. 1877–1902, 2011.
- KURSUNOGLU, N.; ONDER, M. Selection of an appropriate fan for an underground coal mine using the Analytic Hierarchy Process. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 48, p. 101–109, 2015.

- KUSIAK, A.; HERAGU, S. S. The facility layout problem. **European Journal of operational research**, v. 29, n. 3, p. 229–251, 1987.
- LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013.
- LAI, P.-L.; POTTER, A.; BEYNON, M.; BERESFORD, A. Evaluating the efficiency performance of airports using an integrated AHP/DEA-AR technique. **Transport Policy**, v. 42, p. 75–85, 2015.
- LIU, J.; ZHANG, H.; HE, K.; JIANG, S. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on objective space division for the unequal-area facility layout problem. **Expert Systems with Applications**, v. 102, p. 179–192, 2018.
- LIU, K.-H.; HWANG, S.-L.; HSIEH, M.-H.; LIANG, S.-F. M.; CHUANG, C.-F. Systematic layout planning in human–system interface: an evaluation of alarm displays with spatial proximity for accidents diagnosis of advanced boiling water reactor. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 51, p. 30–42, 2016.
- LUZIA, L. F.; RODRIGUES, M. C. **Introdução ao Escalonamento e Aplicações**: estudo sobre as metaheurísticas. Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo, 2009.
- LYNN, N.; SUGANTHAN, P. N. Ensemble particle swarm optimizer. **Applied Soft Computing**, v. 55, p. 533–548, 2017.
- MANITA, G.; KORBAA, O. A hybrid genetic algorithm for solving machine layout problem with consideration of industrial constraints. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 9, p. 2039–2044, 2013.
- MANSON, N. Is operations research really research? **Orion**, v. 22, n. 2, p. 155–180, 2006.
- MELLER, R. D.; GAU, K.-Y. The facility layout problem: recent and emerging trends and perspectives. **Journal of manufacturing systems**, v. 15, n. 5, p. 351–366, 1996.
- MELLER, R. D.; NARAYANAN, V.; VANCE, P. H. Optimal facility layout design. **Operations Research Letters**, v. 23, n. 3, p. 117–127, 1998.
- MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Production**, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.
- MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro:Elsevier, 2012.
- MOHAN, T. K.; PILLAI, V. M. Detailed Dynamic Layout Planning: an adaptive layout approach. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 9, p. 2027–2032, 2013.
- MUTHER, R. **Systematic Layout Planning**. 2. ed. Boston:Cahners Books, 1973.
- NASAB, H. H. A hybrid fuzzy-GA algorithm for the integrated machine allocation problem with fuzzy demands. **Applied Soft Computing**, v. 23, p. 417–431, 2014.

- NIROOMAND, S.; HADI-VENCHEH, A.; ŞAHIN, R.; VIZVÁRI, B. Modified migrating birds optimization algorithm for closed loop layout with exact distances in flexible manufacturing systems. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 19, p. 6586–6597, 2015.
- NOURELFATH, M.; NAHAS, N.; MONTREUIL, B. Coupling ant colony optimization and the extended great deluge algorithm for the discrete facility layout problem. **Engineering Optimization**, v. 39, n. 8, p. 953–968, 2007.
- OJAGHI, Y.; KHADEMI, A.; YUSOF, N. M.; RENANI, N. G.; SYED HASSAN, S. A. H. bin. Production layout optimization for small and medium scale food industry. **Procedia Cirp**, v. 26, p. 247–251, 2015.
- PAES, F. G.; PESSOA, A. A.; VIDAL, T. A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the unequal area facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, v. 256, n. 3, p. 742–756, 2017.
- PAPADAKI, I. N.; CHASSIAKOS, A. P. Multi-objective construction site layout planning using genetic algorithms. **Procedia engineering**, v. 164, p. 20–27, 2016.
- POURVAZIRI, H.; NADERI, B. A hybrid multi-population genetic algorithm for the dynamic facility layout problem. **Applied Soft Computing**, v. 24, p. 457–469, 2014.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do Trabalho Científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo:Feevale, 2013.
- RAZMAK, J.; AOUNI, B. Decision Support System and Multi-Criteria Decision Aid: a state of the art and perspectives. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 22, n. 1-2, p. 101–117, 2015.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International journal of services sciences**, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008.
- SAFARZADEH, S.; KOOSHA, H. Solving an extended multi-row facility layout problem with fuzzy clearances using GA. **Applied Soft Computing**, v. 61, p. 819–831, 2017.
- SILVA, E. L. d.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis:UFSC, 2005.
- SILVA, F. d. A. S. e.; AZEVEDO, C. A. V. de. The Assistat software version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3733–3740, 2016.
- SINGH, A. P.; YILMA, M. Production floor layout using systematic layout planning in Can manufacturing company. In: CONTROL, DECISION AND INFORMATION TECHNOLOGIES (CODIT), 2013 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2013. **Anais...** 2013. p. 822–828.
- SLACK N., B.-J. A.; JOHNSTON, R. **Operations management**. 7. ed. Upper Saddle River:Prentice Hall, 2013.
- TCHOMTÉ, S. K.; GOURGAND, M. Particle swarm optimization: a study of particle displacement for solving continuous and combinatorial optimization problems. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 1, p. 57–67, 2009.

TOMPKINS, J. A.; WHITE, J. A.; BOZER, Y. A.; FRAZELLE, E. H.; TANCHOCO, J. M. A.; TREVINO, J. **Facilities Planning**. 2. ed. New York:John Willey and Sons, 1996.

TORTORELLA, G. L.; FOGLIATTO, F. S. Planejamento sistemático de layout com apoio de análise de decisão multicritério. **Production**, v. 18, n. 3, p. 609–624, 2008.

TRANTAPHYLLOU, E.; MANN, S. H. Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges. **International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice**, v. 2, n. 1, p. 35–44, 1995.

ULUTAS, B.; ISLIER, A. A. Dynamic facility layout problem in footwear industry. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 36, p. 55–61, 2015.

WANG, S.; ZUO, X.; LIU, X.; ZHAO, X.; LI, J. Solving dynamic double row layout problem via combining simulated annealing and mathematical programming. **Applied Soft Computing**, v. 37, p. 303–310, 2015.

WEY, W.-M.; HSU, J. New urbanism and smart growth: toward achieving a smart national taipei university district. **Habitat International**, v. 42, p. 164–174, 2014.

WIYARATN, W.; WATANAPA, A. Improvement plant layout using systematic layout planning (SLP) for increased productivity. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 72, n. 36, p. 269–273, 2010.

XIAO, Y.; XIE, Y.; KULTUREL-KONAK, S.; KONAK, A. A problem evolution algorithm with linear programming for the dynamic facility layout problem—A general layout formulation. **Computers & Operations Research**, v. 88, p. 187–207, 2017.

YARPIZ. **Facility Layout Design and Location Allocation in MATLAB**. 2015.

ZAHEDI, F. The analytic hierarchy process—a survey of the method and its applications. **Interfaces**, v. 16, n. 4, p. 96–108, 1986.

ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z.; BAGOČIUS, V. Multi-criteria selection of a deep-water port in the Eastern Baltic Sea. **Applied Soft Computing**, v. 26, p. 180–192, 2015.

## ANEXO A ARTIGOS DESENVOLVIDOS

Ao longo da construção desta dissertação, três artigos alinhados ao tema foram desenvolvidos. O primeiro, intitulado “*Systematic Layout Planning (SLP) e Analytic Hierarchy Process (AHP) para o planejamento do layout: estudo de caso em uma empresa de embalagens flexíveis*”, foi aprovado e apresentado no L Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO-2018). O segundo artigo, intitulado “*Analytic Hierarchy Process as a decision-making tool for Systematic Layout Planning, involving social responsibility criteria: a case study*”, foi submetido para o *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. Por fim, o terceiro artigo, construído sobre os resultados desta pesquisa e com título provisório “*Layout Planning for Small and Medium Enterprises: An Analysis from Systematic Layout Planning and Particle Swarm Optimization*”, será submetido para *Expert Systems With Applications*.

## ***Systematic Layout Planning (SLP) e Analytic Hierarchy Process (AHP) para o planejamento do layout: estudo de caso em uma empresa de embalagens flexíveis***

Lucas Goecks<sup>1</sup>, Taciana Mareth<sup>2</sup>, Andre L. Korzenowski<sup>1,2</sup>, Jorge André Ribas Moraes<sup>3,4</sup> & Elpidio Oscar Benitez Nara<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup> – PPG em Engenharia de Produção e Sistemas / Unisinos

<sup>2</sup> – PPG em Ciências Contábeis / UNISINOS

<sup>3</sup> – Depto. de Engenharias / UNISC

<sup>4</sup> – PPG em Tecnologia Ambiental / UNISC

<sup>5</sup> – PPG em Sistemas e Processos Industriais / UNISC

### **Resumo**

Este estudo teve como objetivo analisar a contribuição do *Systematic Layout Planning* (SLP) e da *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para o planejamento do layout em uma empresa de embalagens flexíveis. O desenvolvimento foi por meio de um estudo técnico baseado em ferramentas para planejamento SLP, apresentando possibilidades de *layouts*, e, por métodos multicritérios para a tomada de decisão, selecionando a melhor proposta através do estudo do AHP. Os resultados mostram que o *layout* 4 é o que melhor atende as necessidades da empresa em análise. O *layout* 2 obteve resultado aproximado ao citado anteriormente e, por esta razão, é possível aplicá-lo também. Já, os *layouts* 5 e 1, por possuírem um fluxo de materiais muito longo, demonstraram resultados inferiores, pois não atendem os critérios pré-estabelecidos.

**Palavras-chave:** *Systematic Layout Planning, Analytic Hierarchy Process, Layout.*

### **Abstract**

The aim of this study was to analyze the contribution of Systematic Layout Planning (SLP) and Analytic Hierarchy Process (AHP) for layout planning in a flexible packaging company. The development was through a technical study based on tools for SLP planning, presenting possibilities of layouts, and, by multi-criteria methods for decision making, selecting the best proposal through the AHP study. The results show that layout 4 is the one that best meets the needs of the company under analysis. Layout 2 has obtained an approximate result to the one mentioned above and, for this reason, it is possible to apply it as well. Layouts 5 and 1 have a very long flow of materials and have shown inferior results, since they do not meet the pre-established criteria.

**Keywords:** Systematic Layout Planning, Analytic Hierarchy Process, Layout.

### **1 Introdução**

O planejamento do *layout* é um importante problema prático para as empresas de fabricação. Nas atuais condições do mercado, caracterizadas pela constante mudança do portfólio de produtos e o encurtamento dos ciclos de vida deste, é necessária uma reconfiguração frequente do *layout*, para a empresa continuar a ser competitiva (Gyulai et al., 2016). Devido ao importante significado de reduzir os custos de produção, o planejamento de *layout* de instalação é estudado a muitos anos (Liu et al., 2017). O *layout* de instalações deve respeitar todas as restrições de projeto, ou seja, os limites do local e suas capacidades, para que assim possa ser considerado viável (Hammad et al., 2017). Se a organização possibilita antecipar uma análise, com certeza esta irá optar pelo modelo que melhor se adequa às suas características. Tortorella & Fogliatto (2008) mencionam que a importância da distribuição física de um processo é reforçada pelas consequências a longo prazo das decisões e do custo de se projetar novamente a planta fabril. Desta maneira, um *layout* inicial correto é fundamental para o sucesso operacional da organização.

A tomada de decisões é uma importante atividade humana, independentemente de atividades diárias, profissionais ou políticas. Os problemas de decisão, em geral, envolverão vários pontos de vista conflitantes (critérios) que devem ser levados em consideração conjuntamente, para chegar a uma decisão razoável (Govindan & Jepsen, 2016). O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é um método estrutural e hierárquico de análise quantitativa. Embora tenha sido utilizado em campos sociais e econômicos, existem muitas outras aplicações para esta ferramenta, como o planejamento de *layout* (Li et al., 2016). O *Systematic Layout Planning* (SLP) é um método que, a

partir do fluxo de materiais e da inter-relação entre as atividades, sistematiza uma lógica para o planejamento de *layouts*.

O objetivo do presente estudo é analisar a contribuição do SLP e do AHP para o planejamento do layout em uma empresa de embalagens flexíveis. Contribui para o setor empresarial apresentando o sequenciamento de uma ferramenta de gestão/planejamento e uma de tomada de decisão para a elaboração de *layouts*. O desenvolvimento foi por meio de um estudo técnico baseado na ferramenta para planejamento SLP, apresentando possibilidades de *layouts*, e, por métodos multicritérios para a tomada de decisão, selecionando a melhor proposta através do estudo do AHP.

## 2 Planejamento de *layout*

O objetivo de se planejar o *layout* é permitir a fabricação de produtos nas quantidades, volumes e variedades necessárias e, além disso, utilizar de forma eficaz a mão de obra, o espaço e a infraestrutura (Matusek, 2012). O que ajuda a otimizar a capacidade do processo é o planejamento das instalações, melhorando o tempo de produção, a produtividade e a eficiência (Drira et al., 2007). O *layout* é o trabalho ou o plano de instalação (máquinas, ferramentas, dispositivos, etc.) requerido para o processo de produção; é a disposição de empregados, materiais, máquinas e outros suportes de fabricação e instalações para criar o arranjo físico ideal. O *layout* deve ser planejado com cuidado, a fim de atender a requisitos para as demandas de produção e processo. O planejamento do *layout* é a base fundamental das plantas industriais e pode influenciar diretamente na eficiência do trabalho (Watanapa et al., 2011). Várias alternativas de projeto de *layout* podem ser planejadas considerando múltiplas soluções de arranjos físicos das instalações de fabricação, que conduzem a diferentes vantagens e desvantagens uma sobre a outra. A decisão para a seleção adequada de um *layout* torna-se agora mais complexa devido ao envolvimento de vários critérios conflitantes (Karande & Chakraborty, 2014). Desta forma, a utilização de uma ferramenta para a elaboração de alternativas (SLP) associada a um método multicriterial de tomada de decisão (AHP) pode contribuir na escolha do *layout* mais adequado a uma dada organização.

### 2.1 *Systematic Layout Planning*

O *Systematic Layout Planning* (SLP) é uma abordagem processual de projeto de *layout*, onde a metodologia envolvida na execução é relativamente simples; porém, é uma ferramenta comprovada na prestação de guia no projeto de arranjos físicos nas últimas décadas (Yang et al., 2000). O Sistema SLP é uma coordenação de projetos de *layout*. Consiste de uma estruturação de fases, de um modelo de procedimentos e de uma série de dados para identificação, avaliação e visualização das áreas e elementos envolvidos no planejamento. O fluxo de materiais, por exemplo, é um fator determinante para o arranjo físico muitas vezes (Muther, 1978). O método pode ser definido como um fluxograma de processos, inter-relacionando as atividades de acordo com as necessidades de proximidades/afastamento e o fluxo a ser seguido; sendo assim uma sistematização lógica no planejamento de *layout*. A metodologia para a implantação é dividida em: diagrama de relação de atividades e diagrama adimensional de blocos.

O diagrama de relação de atividades, também chamado de diagrama de análise de afinidades, mostra as relações de cada setor com qualquer outro departamento ou área. Respondendo a seguinte pergunta: Qual é a importância deste setor estar próximo de outra instalação de serviço? Este questionamento necessita ser realizado de forma imprescindível. Para se elaborar a importância da proximidade, este questionamento deve ser elaborado com o consentimento de várias pessoas que tenham amplo conhecimento da planta fabril (Meyers & Stephens, 2005). O Diagrama de relação de atividades é uma matriz triangular onde se apresenta o grau de proximidade entre uma certa atividade em relação a outras (Muther, 1978). Cada par de departamento representa uma classe específica de adjacência, subdivididos em, A (Absolutamente necessário), E (especialmente necessário), I (importante), O (Pouco importante), U (desprezível) e X (indesejável) (De Carlo et al., 2013).

Uma etapa intermediária é a planilha de relação de atividades que serve para facilitar o entendimento do diagrama de relação de atividades/setores, obtendo através dela os dados básicos

para a elaboração do diagrama adimensional de blocos. A planilha de relação de atividades apresenta os mesmos valores obtidos no diagrama de relação de atividades, é uma transcrição de dados (Meyers & Stephens, 2005). Representa a primeira tentativa de distribuição e resultado da planilha de relação de atividades. Mesmo que essa distribuição seja adimensional, será a base para o plano de distribuição principal e desenho do projeto. Uma vez que se tenha determinado o tamanho de cada setor, se distribuirá os espaços para cada atividade por meio da distribuição do diagrama adimensional de blocos (Meyers & Stephens, 2005).

O diagrama de blocos é o método mais simples para se representar um processo. Consiste em que cada atividade se encerra com um retângulo, após este se conecta com outro indicando o fluxo do material por flechas. Na representação do *layout* costuma-se se iniciar pela parte superior direita da folha (Urbina, 2001). Após se realiza a análise de fluxo do diagrama, tendo como conceito demonstrar o caminho percorrido pelos materiais nos setores distribuídos. Esta análise garantirá que as relações importantes se mantenham e que a distribuição elaborada tenha sentido; propiciando um fluxo correto do material, evitando que este ultrapasse vários setores (Meyers & Stephens, 2005).

## 2.2 Analytic Hierarchy Process

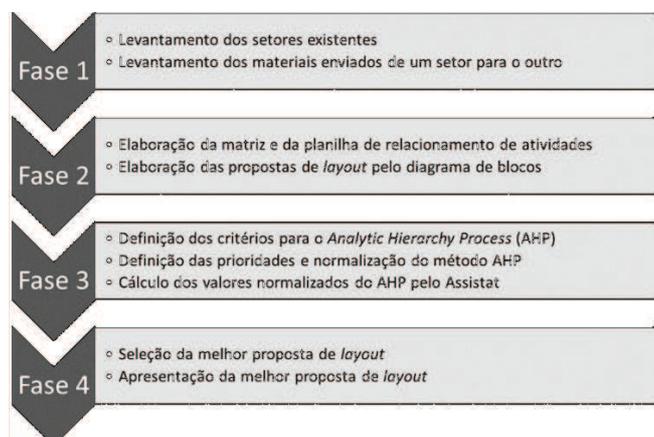
Talvez a tarefa mais criativa em tomar uma decisão é escolher os fatores que são importantes para essa decisão. No *Analytic Hierarchy Process* (AHP), esses fatores, uma vez selecionados, são organizados em uma estrutura hierárquica que desce de um objetivo geral para critérios, subcritérios e alternativas em níveis sucessivos (Saaty, 1990). O AHP propicia uma maior simplicidade na modelagem do processo de decisão (Ehrlich, 1996.). É um método que aplica a matemática para processar as preferências dos indivíduos ou grupos decisores. Este método sugere a elaboração de hierarquias para se fazerem julgamentos. Os critérios de avaliação são mensurados em diferentes escalas (Colin, 2007). Gosende (2016) destaca que o AHP é uma das ferramentas *Multiple-criteria decision-making* (MCDM) mais utilizadas na avaliação de *layouts*. Na valorização da importância dos critérios, utiliza-se a escala de nove pontos de Saaty.

De acordo com Costa (2006) e Tortorella & Fogliatto (2008), o método AHP está fundamentado em três princípios de pensamento analítico. Mas conforme Colin (2007), para facilitar o entendimento, a aplicação do método AHP pode ser dividido em quatro partes: 1) representação hierárquica, elaboração da hierarquia de decisão em relação aos vários níveis de elementos inter-relacionados; 2) comparação por pares, avaliação das preferências em relação a cada elemento de decisão em um determinado nível da hierarquia; 3) método do autovalor, para estimar os pesos relativos dos elementos decisórios em um determinado nível e avaliar a coerência das preferências estipuladas nas comparações por pares; 4) agregação das propriedades, modo de avaliar o resultado referente ao objetivo. Detalhes sobre os procedimentos de cálculo podem ser obtidos em Campos (2008).

## 3 Materiais e Métodos

O estudo de caso foi realizado em uma empresa de embalagens flexíveis. Coletaram-se dados (tempos e fluxo de materiais entre setores) do processo produtivo no sistema da empresa para elaborar a proposta de *layout*. Além disso, foram questionados os gestores das áreas para compreensão da inter-relação entre as atividades. A figura 1 apresenta as 4 fases do fluxo global do modelo.

Figura 1 – Fluxo global do modelo proposto



Na fase 1 tem-se o levantamento dos setores/processos produtivos da empresa, que foram inseridos na proposta de *layout*. Em seguida, a partir dos materiais consumidos nos processos produtivos, identificaram-se as porcentagens de material enviado para diferentes setores do processo produtivo da empresa em análise.

Na fase 2 inicia-se a execução da ferramenta *Systematic Layout Planning* (SLP). Primeiramente, elaborou-se a matriz de relacionamento de setores, auxiliada pela planilha de relacionamento, para facilitar o entendimento durante o processo. Posteriormente, a disposição das áreas foi identificada de acordo com a importância de proximidade. Este último processo ocorreu pela distribuição adimensional de blocos e, para facilitar a análise desta etapa, definiram-se também os blocos conforme os tamanhos aproximados de cada setor.

Na fase 3 definiram-se os critérios para auxiliar na tomada de decisão para a escolha da melhor proposta de *layout* planejada, conforme o sistema SLP. Os valores mensurados foram transmitidos em relação ao seu grau de importância comparando um com o outro, proposta com proposta e critério com critério. Após definir cada atributo de projeto a ser executado, estipulou-se o grau de importância, de acordo com a escala fundamental de Saaty, para comparar critério a critério (GOSENDE, 2016). Estas comparações são definidas através da medição da distância entre setores e da avaliação de possibilidade de ampliação em relação ao espaço atual. Cada peso está expresso conforme a tabela de valores para análise do projeto da nova planta fabril da empresa. Com a equipe de planejamento, pode-se definir o quão cada critério é mais importante que o outro, qual a distância percorrida da matéria prima até o produto final e quais das propostas permitem a ampliação do número de máquinas para elevar a capacidade produtiva, ou novas linhas de produto. Os valores definidos nesta fase serviram para comparar qual a melhor proposta a ser planejada. O *software* Assistat calculou os valores de  $\lambda_{max}$ , CI (índice de consistência), RI (consistência randômico) e CR (consistência randômica). Estes valores auxiliaram na verificação da confiabilidade das prioridades definidas e no resultado da fase 5.

Na fase 4 selecionou-se a melhor proposta de *layout* por meio de uma análise comparativa entre os resultados do método AHP. O método AHP foi selecionado por ser tratar de um problema de escolha do melhor *layout*, onde os *inputs* se dão por comparações pareadas e como *output* tem-se um *ranking* completo de *scores*. O método permite com algum esforço imputar comparações entre variáveis qualitativas e quantitativas. Assim, a meta é selecionar um *layout* eficiente e que, ao mesmo tempo, atenda aos padrões de qualidade e as necessidades da empresa. Para a análise dos dados levantados na etapa decisória foi utilizado um *software* de estatística Assistat (desenvolvido pelo professor Dr. Francisco de A. S. e Silva da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Brasil). Os valores obtidos pelo *software* Assistat são oriundos das fórmulas fornecidas pelo método AHP. Após estas etapas, o *software* normaliza a matriz e simula os valores de acordo com as fórmulas do método AHP. Conforme o *software*, os valores de RI são tabelados

e uma reavaliação da matriz de comparação poderá ser necessária caso o valor de CR seja maior que 0,1 (Saaty, 1980; Ramos, 2000).

#### 4 Apresentação e análise dos resultados

Esta seção apresenta e analisa os resultados do presente estudo que teve como objetivo analisar a contribuição do *Systematic Layout Planning* (SLP) e da *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para o planejamento do layout em uma empresa de embalagens flexíveis. Para tanto, dividiu-se em 3 seções: fluxo de material entre processos, projeto de *layout* pelo SLP, AHP e a tomada de decisão.

##### 4.1 Fluxo de material entre processos

A empresa a ser analisada possui distintos processos produtivos, sendo eles: extrusão, armazenagem, impressão, parafinação, revisão, metalização, laminação, rebobinagem, corte e solda. Estes processos podem estar, ou não, ligados um diretamente ao outro. Todas as atividades são em sequência, uma dependente da outra, com exceções de alguns casos em que o material é retrabalhado na mesma máquina.

O setor de extrusão da empresa analisada produz bobinas de Polietileno (PE) e Polipropileno (PP) que são enviadas ao setor de almoxarifado, em 100% dos casos. O setor de almoxarifado, local de armazenagem da matéria prima, envia as bobinas de PE, PP, polipropileno bi-orientado (BOPP), poliéster ou polietileno tereftalato (PET), papel e alumínio aos setores de impressão e laminação. Em alguns casos envia para o parafinação, metalização, rebobinagem e corte e solda, sendo estas ocorrências não muito frequentes, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Porcentagem de material enviado entre setores

Impressão - Janeiro/2014 - Junho/2015		Quantidade (kg)	Porcentagem
<b>Roteiro</b>	$\Sigma =$	5.760.135,07	100,00%
Impressão → Parafinadeira		462.067,00	8,03%
Impressão → Rebobinamento		1.610.763,87	27,96%
Impressão → Rebobinamento/Revisão		3.686.898,80	64,01%
<b>Total</b>	<b>=</b>	<b>5.760.135,07</b>	<b>100,00%</b>

Revisão - Janeiro/2014 - Junho/2015		Quantidade (kg)	Porcentagem
<b>Roteiro</b>	$\Sigma =$	3.686.898,80	100,00%
Rebobinamento/Revisão → Expedição		2.049,00	0,06%
Rebobinamento/Revisão → Impressão		12.357,00	0,34%
Rebobinamento/Revisão → Rebobinamento		19.761,80	0,54%
Rebobinamento/Revisão → Metalização		1.603.817,50	43,50%
Rebobinamento/Revisão → Laminação		2.048.913,50	55,57%
<b>Total</b>	<b>=</b>	<b>3.686.898,80</b>	<b>100,00%</b>

Metalização - Janeiro/2014 - Junho/2015		Quantidade (kg)	Porcentagem
<b>Roteiro</b>	$\Sigma =$	1.603.817,50	100,00%
Metalização → Expedição		117,00	0,01%
Metalização → Impressão		2.325,90	0,15%
Metalização → Corte Solda		427.244,40	26,64%
Metalização → Laminação		616.654,80	38,45%
Metalização → Rebobinamento		557.475,40	34,76%
<b>Total</b>	<b>=</b>	<b>1.603.817,50</b>	<b>100,00%</b>

Laminação - Janeiro/2014 - Junho/2015		Quantidade (kg)	Porcentagem
<b>Roteiro</b>	$\Sigma =$	4.034.097,53	100,00%
Laminação → Impressão		112.808,12	2,80%
Laminação → Rebobinamento		3.921.289,41	97,20%

<b>Total</b>	=	<b>4.034.097,53</b>	<b>100,00%</b>
<b>Rebobinamento - Janeiro/2014 - Junho/2015</b>			
<b>Roteiro</b>	$\Sigma =$	<b>6.447.234,17</b>	<b>100,00%</b>
Rebobinamento → Laminação		1.404,70	0,02%
Rebobinamento → Impressão		2.721,80	0,04%
Rebobinamento → Corte Solda		2.168.242,60	33,63%
Rebobinamento → Expedição		4.274.865,07	66,31%
<b>Total</b>	=	<b>6.447.234,17</b>	<b>100,00%</b>
<b>Parafina deira - Janeiro/2014 - Junho/2015</b>			
<b>Roteiro</b>	$\Sigma =$	<b>372.355,77</b>	<b>100,00%</b>
Parafina deira → Rebobinamento		372.355,77	100,00%
<b>Total</b>	=	<b>372.355,77</b>	<b>100,00%</b>
<b>Corte e Solda - Janeiro/2014 - Junho/2015</b>			
<b>Roteiro</b>	$\Sigma =$	<b>710.116,18</b>	<b>100,00%</b>
Corte e Solda → Expedição		710.116,18	100,00%
<b>Total</b>	=	<b>710.116,18</b>	<b>100,00%</b>

Os dados dos setores de impressão, parafinação, revisão, metalização, laminação, rebobinagem, corte e solda, foram exportados do sistema conforme os valores fornecidos pelos apontamentos de produção. O levantamento da porcentagem veio através da relação de quanto do total de produção foi enviado para a etapa seguinte, desta maneira cada setor teve uma porcentagem de recebimento do material produzido na etapa anterior. Por exemplo, a Parafina deira recebeu 8,03% do material que foi oriundo da Impressão no período de Janeiro/2014 a Junho/2015.

#### 4.2 Projeto de *layout* pelo *Systematic Layout Planning*

Para desenvolver o projeto de layout pelo SLP, primeiramente foram elaborados o diagrama de relação de atividades (matriz de relacionamento de setores) e o diagrama de blocos. Em seguida, através do método SLP foram definidos dois projetos de *layouts*.

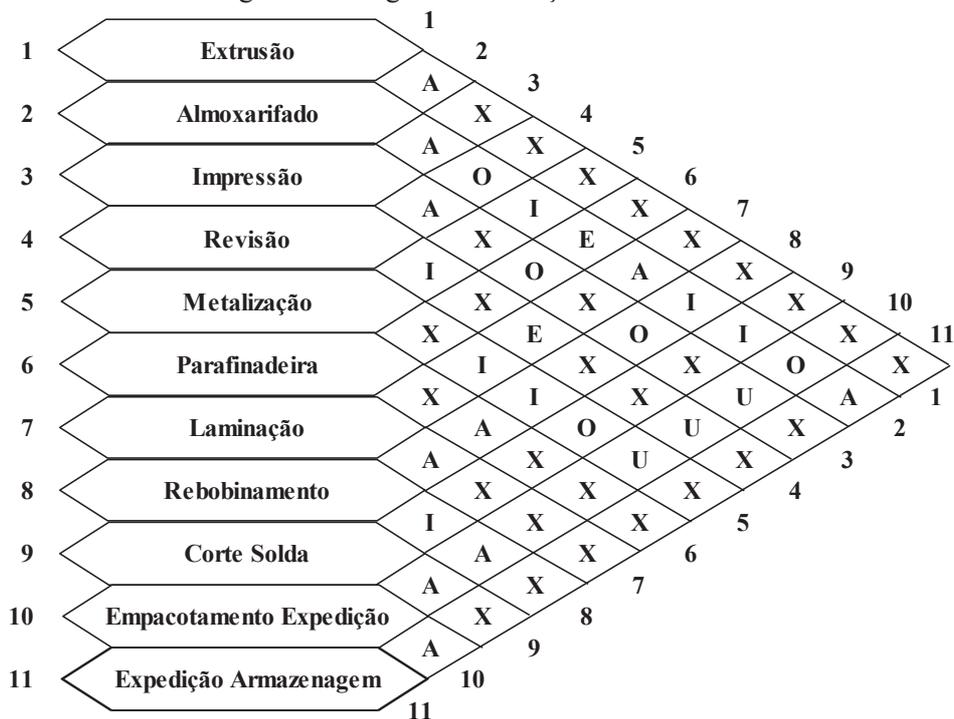
O diagrama de relação de atividades tem como função apresentar o nível de importância ou proximidade de um setor em relação ao outro. Para a elaboração deste diagrama foi definido, em conjunto com os gestores de produção da empresa em análise, um guia (Tabela 2) com código, descrição e os critérios com suas respectivas porcentagens.

Tabela 2 – Guia para elaboração do diagrama de relação de atividades

<b>Código</b>	<b>Legenda</b>	<b>Crítérios</b>
A	Absolutamente importante	$060\% \leq X \leq 100\%$
E	Especialmente importante	$050\% \leq X < 060\%$
I	Importante	$030\% \leq X < 500\%$
O	Pouco importante	$005\% \leq X < 030\%$
U	Sem importância	$000\% < X < 005\%$
X	Não desejável	0%

Observando o guia, os gestores puderam definir a importância quando se compara setor com setor a partir do fluxo de material (Tabela 1). Com os dados de produção levantados, calculados e analisados, pode-se definir o diagrama de relação de atividades (Figura 2).

Figura 2 – Diagrama de relação de atividades



Conforme apresenta a figura 2, os setores foram analisados e codificados e, este processo foi repetido para os demais setores até o preenchimento de todo o diagrama de relação de atividades. Se, por um lado, é absolutamente importante (código A – tabela 2) a proximidade de alguns setores (extrusão e almojarifado, almojarifado e impressão, impressão e revisão). Por outro lado, não é desejável a proximidade entre outros setores (metalização e parafinaadeira, parafinaadeira e laminação).

A partir do fluxo de materiais e dos dados levantados no diagrama de relação de atividades, elaborou-se o diagrama de blocos para auxiliar o planejamento do *layout*. Esta etapa se inicia com a montagem da Tabela 3 apresentando a numeração nos respectivos espaços definidos. Concluída esta etapa, iniciou-se as simulações de *layout* de acordo com os critérios para montagem da planta fabril.

Tabela 3 – Diagrama de blocos

Atividades	A	E	I	O	U	X
1. Extrusão	2					3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11
2. Almojarifado	1, 3, 7 e 11	6	5, 8 e 9	4 e 10		
3. Impressão	2 e 4			6 e 8	10	1, 5, 7, 9 e 11
4. Revisão	3	7	5	2	10	1, 6, 8, 9 e 11
5. Metalização			4, 7 e 8	9	10	1, 2, 3, 6 e 11
6. Parafinaadeira	8	2		3		1, 4, 5, 7, 9, 10, 11
7. Laminação	2 e 8	4	5			1, 3, 6, 9, 10, 11
8. Rebobinamento	7 e 10		2, 5 e 9	3		1, 4, 6 e 11
9. Corte Solda	10		8	5		1, 3, 4, 6, 7 e 11
10. Empacotamento	8, 9 e 11			2	3, 4 e 5	1, 6 e 7
11. Armazenagem	2 e 10					1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9

A Tabela 3 evidencia as atividades levantadas e os códigos de proximidades (números correspondentes a proximidade definida na comparação entre os setores por meio dos dados levantados do fluxo do processo). As 11 atividades levantadas estão representadas na Figura 3 por

meio dos blocos. Os valores de proximidade foram distribuídos no centro e nos cantos de acordo com o nível de classificação anterior. Os quadros não precisam obrigatoriamente representar o tamanho que deve ter cada setor, este processo é opcional para quem irá planejar um determinado processo.

Figura 3 – Blocos de cada setor para confecção do *layout*



Desta maneira, no canto superior esquerdo ficaram dispostas as atividades com o código “A” e no direito as tarefas com o código de importância “E”. Nos cantos inferiores estão distribuídas as relações de código “I” e “O”, ficando do lado esquerdo e direito, respectivamente. As atividades de código “U” são omitidas dos quadros e, no centro, ficam as relações “X” (abaixo do número/nome da atividade). Uma vez que as 11 atividades estejam listadas, deve-se distribuir as etapas que compõem o processo da empresa de maneira que mais irá satisfazer o projeto de *layout* e avaliar todas as possibilidades de planejamento. Inicia-se com a atividade considerada mais importante do fluxo de produção, permitindo um fluxo coerente com o processo possibilitando simplificar e otimizar a planta fabril.

Através do método SLP foram definidos dois projetos de *layouts*: um com setores mais centralizados (Figura 4) e outro favorecendo a descentralização (Figura 5). As setas indicando os fluxos apresentam a cadeia principal; atividades secundárias que se encontram alocadas ao lado do setor, não estão representadas por setas devido ao baixo impacto.

Figura 4 – Proposta centralizada

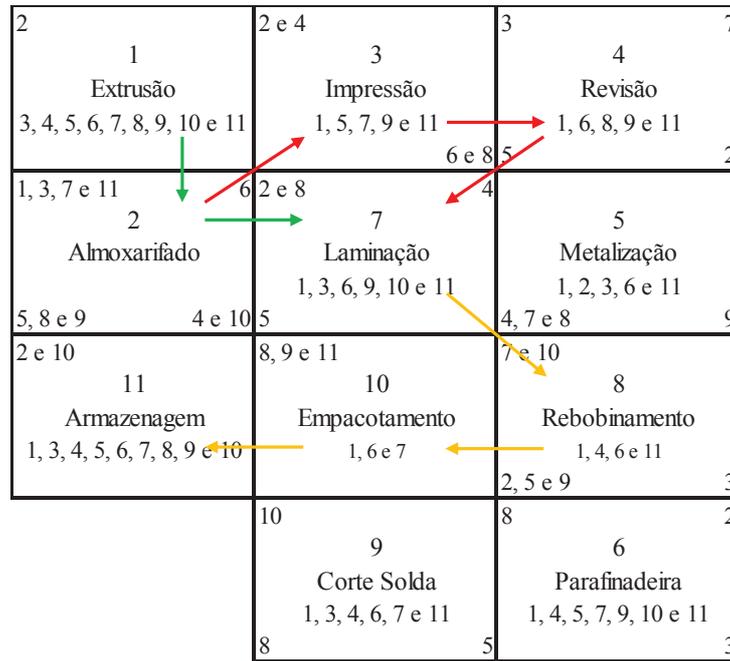
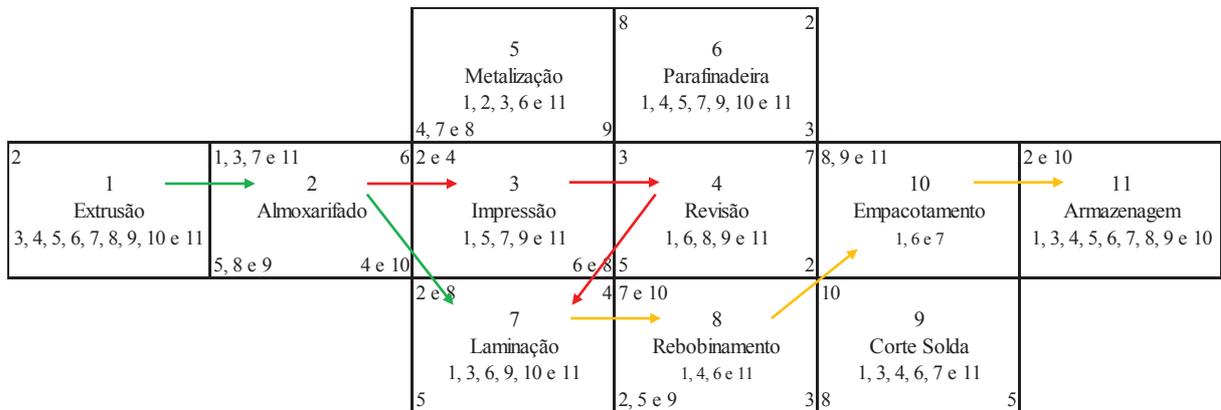


Figura 5 – Proposta descentralizada



Após apresentar duas propostas iniciais, simulou-se uma nova disposição, porém com o tamanho aproximado de cada setor (Figuras 6 e 7). Esta nova distribuição permitiu vislumbrar o espaço que cada setor ocupa e proporcionou uma projeção fidedigna quanto a nova realidade da empresa em análise. Os setores de transformação tiveram seus espaços ampliados, possibilitando o crescimento da empresa e a introdução de novas máquinas.



se às práticas de higiene e limpeza praticadas por todos os funcionários da empresa, o que facilita a possibilidade de implementação da ISO 22000, promovida também pelo projeto da nova fábrica. O fluxo de material tem papel importante perante a proposta de ampliação, já que este deve ser de maneira lógica, evitando excesso de movimentos, tornando o projeto mais harmônico e linear. Por fim, a ampliação de espaço, se comparado ao atual, permite o aumento da sua capacidade de produção, visto que há espaços disponíveis para a instalação de novas máquinas e armazenagem de produto intermediário.

Após definir cada atributo de projeto a ser executado, estipulou-se o grau de importância (Tabela 4). Os atributos BPF, ISO 22000 e ampliação, foram comparados de acordo com a importância de um em relação ao outro. Estabeleceu-se os layouts 1 e 2 levando em consideração o tamanho atual da empresa, os layouts 3 e 4 visando a ampliação, o layout 5 projeto planejado pela empresa. O atributo fluxo foi medido (em metros) conforme escalas fornecidas pelas plantas da empresa (atual e planejada).

Tabela 4 – Nível de aplicabilidade dos layouts entre os atributos

Layout	BPF	ISO 22000	Fluxo	Ampliação
Layout 1 - Proposta descentralizada (tamanho atual)	5	3	194	1
Layout 2 - Proposta centralizada (tamanho atual)	5	3	150	1
Layout 3 - Proposta centralizada (ampliação)	9	9	302	9
Layout 4 - Proposta descentralizada (ampliação)	9	9	242	9
Layout 5 - Proposta da empresa em análise	9	9	368	9

Os *layouts* 3, 4 e 5 foram definidos como nove vezes (tabela 4) mais importantes (para os 4 atributos) devido ao espaço disponível que facilitará a implementação destes projetos, por este motivo as outras duas propostas tiveram valores menores. Após fazer a análise da importância de um setor em relação ao outro, utilizou-se o *software* Assistat para definir a melhor proposta de *layout*. Ao ordenar o melhor *layout* obtido, tem-se a proposta fornecida pelo método AHP, conforme apresenta a tabela 5.

Tabela 5 – Ordenação do melhor *layout* obtido

Ordenação do melhor <i>layout</i>	
Layout 4	0,2466
Layout 2	0,2436
Layout 3	0,1949
Layout 5	0,1576
Layout 1	0,1572

Os resultados mostram que o *layout* 4 é o que melhor atende as necessidades da empresa em análise. O *layout* 2 obteve resultado aproximado ao citado anteriormente e, por esta razão, é possível aplicá-lo também. Já, os *layouts* 5 e 1, por possuírem um fluxo de materiais muito longo, demonstraram resultados inferiores, pois não atendem os critérios pré-estabelecidos.

Ao analisar os resultados obtidos pela aplicação do método AHP, observa-se uma aproximação de valores entre os *layouts* 4 e 2, e 5 e 1. Este caso de aproximação, pode gerar dúvida no momento de implementar a melhor proposta, pois se algum valor de comparação entre os critérios alterar, este resultado poderá ser diferente do apresentado na tabela 5. Ao se analisar os critérios BPF, ISO 22000 e ampliação junto com a gerência, perceberam-se que os valores eram iguais pelo fato de projetar uma nova fábrica, sendo assim, todos receberam o mesmo grau de importância no momento da comparação.

## 5 Considerações Finais

A pesquisa apresentou um método para tomada de decisão de qual melhor *layout* se planejar, incluindo a análise da eficiência do mesmo. Para tanto, um sequenciamento de

ferramentas de gestão/planejamento foi analisado em conjunto com um método de análise multicritério. O objetivo foi de analisar a contribuição do *Systematic Layout Planning* (SLP) e da *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para o planejamento do layout em uma empresa de embalagens flexíveis.

O método proposto demonstrou a contribuição de cada fase no desenvolvimento desta pesquisa. A fase 1 permitiu maior interação com os gestores da companhia e forneceu as informações necessárias sobre o processo produtivo desta. Na fase 2, o SLP demonstrou a sua versatilidade quanto ao fornecimento das propostas de layouts. Já a fase 3 evidenciou o quão importante é utilizar-se de ferramentas para o auxílio na tomada de decisão, visto que as propostas fornecidas pelo SLP agradam diferentes gestores/pessoas da empresa. Sendo assim, torna-se necessário, através de critérios, decidir uma proposta, e que seja aquela que atenda às necessidades do negócio. Finalmente, a fase 4 evidenciou a situação atual da organização e qual o caminho que a mesma deverá seguir para otimizar o fluxo produtivo. Sendo assim, esta pesquisa demonstrou que utilizar um método de suporte à tomada de decisão para planejamento de *layouts* dentro de um ambiente empresarial pode ser benéfico. Em função da decisão estruturada que ele proporciona.

Quanto a pesquisas futuras para aprimoramento deste trabalho, sugere-se a aplicação de outras ferramentas para a tomada de decisão que possam melhorar as proximidades de resultados obtidas (*layouts* 4/2 e 5/1) ou ainda, aprofundar a análise de sensibilidade. Também, sugere-se a adoção de metaheurísticas para a otimização no planejamento de *layouts* através de algoritmos. A adoção de algoritmos para as metaheurísticas permite a inserção de múltiplos critérios, onde estes podem reduzir custos e proporcionar uma melhor delimitação do macro *layout* pelo planejamento dos espaços entre setores e da correta dimensão dos espaços que serão distribuídos pelo arranjo físico.

## Referências

- Assistat. (2016). *Assistência Estatística*. Recuperado em 19 de maio de 2016, de <http://www.assistat.com/indexp.html>
- Baca, U. G. (2001). *Evaluación de proyectos*. McGraw-Hill.
- Campos, A. J. D. M. (2009). *Análise de critérios de decisão em estratégia de arranjos produtivos locais: um estudo aplicando o processo de hierarquia analítica (AHP) no setor de cerâmica* (Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Colin, E. C. (2007). *Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas*. Livros Técnicos e Científicos.
- Costa, H. G. (2006). Auxílio multicritério à decisão: método AHP. *Rio de Janeiro: Abepro*.
- De Carlo, F., Arleo, M. A., Borgia, O., & Tucci, M. (2013). Layout design for a low capacity manufacturing line: a case study. *International Journal of Engineering Business Management*, 5, 35.
- Dira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 255-267.
- Ehrlich, P. J. (1996). Modelos quantitativos de apoio as decisões: II. *Revista de Administração de Empresas*, 36(2), 44-52.
- Gerhardt, T. E., & Silveira, D. T. (2009). *Métodos de pesquisa*. Plageder.
- Gil, A. C. (2002). Como elaborar projetos de pesquisa. *São Paulo*, 5(61), 16-17.
- Gosende, P. A. P. (2016). Evaluación de la distribución espacial de plantas industriales mediante un índice de desempeño. *Revista de Administração de Empresas*, 56(5), 533-546.
- Gyulai, D., Szaller, Á., & Viharos, Z. J. (2016). Simulation-based Flexible Layout Planning Considering Stochastic Effects. *Procedia CIRP*, 57, 177-182.
- Hammad, A. W., Rey, D., & Akbarnezhad, A. (2017). A cutting plane algorithm for the site layout planning problem with travel barriers. *Computers & Operations Research*, 82, 36-51.
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2014, January). A facility layout selection model using MACBETH method. In *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, January (pp. 7-9).

- Li, M. K., Liu, Y. K., Peng, M. J., Xie, C. L., & Yang, L. Q. (2016). The decision making method of task arrangement based on analytic hierarchy process for nuclear safety in radiation field. *Progress in Nuclear Energy*, 93, 318-326.
- Liu, J., Wang, D., He, K., & Xue, Y. (2017). Combining Wang–Landau sampling algorithm and heuristics for solving the unequal-area dynamic facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 262(3), 1052-1063.
- Matussek, M. (2012). Layout Planning: A Case Study on Engineering-to-Order Company. In *Jeseník, Republica de Checoslováquia, União Europeia: Carpathian Logistic Congress–CLC* (pp. 7-9).
- Stephens, M. P., & Meyers, F. E. (2013). *Manufacturing facilities design and material handling*. Purdue University Press.
- Moghadasli, A., Sarwat, A., & Guerrero, J. M. (2016). Multiobjective optimization in combinatorial wind farms system integration and resistive SFCL using analytical hierarchy process. *Renewable Energy*, 94, 366-382.
- Muther, R. (1978). Planejamento do Lay-Out. *Sistema SLP. São Paulo. Ed. Edgard Blucher*.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Silva, F. A. (1996). The ASSISTAT Software: statistical assistance. In *International conference on computers in agriculture* (Vol. 6, pp. 294-298). Cancun: American Society of Agricultural Engineers.
- Tortorella, G. L., & Fogliatto, F. S. (2008). Planejamento sistemático de layout com apoio de análise de decisão multicritério. *Production*, 18(3), 609-624.
- Yang, T., Su, C. T., & Hsu, Y. R. (2000). Systematic layout planning: a study on semiconductor wafer fabrication facilities. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(11), 1359-1371.
- Watanapa, A., Kajondecha, P., Duangpitakwong, P., & Wiyaratn, W. (2011). Analysis Plant Layout Design for Effective Production. In *International Multiconference of Engineers and Computer scientists (IMECS 2011) Vol II, Hong Kong*.
- Wiyaratn, W., & Watanapa, A. (2014). Study on Basket Document Factory Plant Layout for Proficient Production. In *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists* (Vol. 2).
- Weil, K. E. (1979). Planejamento do layout, sistema SLP. *Revista de Administração de Empresas*, 19(3), 103-104.

## **Analytic Hierarchy Process as a decision-making tool for Systematic Layout Planning, involving social responsibility criteria: a case study**

Lucas Goecks<sup>1</sup> – lucas\_goecks@hotmail.com  
Taciana Mareth<sup>2</sup> - akorzenowski@unisinis.br  
Andre L. Korzenowski<sup>1,2</sup> - tmareth@unisinis.br  
Jorge André Ribas Moraes<sup>3,4</sup> – jorge@unisc.br  
Elpidio Oscar Benitez Nara<sup>3,5</sup> – elpidio@unisc.br

<sup>1</sup> – PPG em Engenharia de Produção e Sistemas / UNISINOS

<sup>2</sup> – PPG em Ciências Contábeis / UNISINOS

<sup>3</sup> – Departamento de Engenharias / UNISC

<sup>4</sup> – PPG em Tecnologia Ambiental / UNISC

<sup>5</sup> – PPG em Sistemas e Processos Industriais / UNISC

UNISINOS: Av. Unisinis, 950 - Cristo Rei, São Leopoldo - RS, 93020-190

UNISC: Av. Independência, 2293 - Universitário, Santa Cruz do Sul - RS, 96815-900

### **Abstract**

In the current market conditions, characterized by the constant change of the product portfolio and the shortening of their life cycles, it is necessary the frequent reconfiguration of the layout. In this way, layout planning is an important practical problem for manufacturing companies. Layout planning involves reducing inventories in the process, lead-time, using existing space more effectively, seeking to make the plant adaptable to future changes and providing a healthy, convenient and safe environment for employees. In contrast to these goals, decision-making is an important activity that generally involves several conflicting viewpoints (criteria) that must be considered together to arrive at a reasonable decision. In this way, this study aimed to analyze the contribution of the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Systematic Layout Planning (SLP) as a method of layout planning for company managers, involving social responsibility criteria. Firstly, a technical study was performed presenting possibilities of layouts from the tools for SLP planning. Next, the best proposal was selected using the AHP, multi-criteria method for decision-making. The results show that layouts 4 and 2 are the ones that best meet the needs of the company under analysis. Already, layouts 5 and 1, because they have a very long flow of materials, have shown inferior results, since they do not meet the pre-established criteria.

**Keywords:** Systematic Layout Planning; Analytic Hierarchy Process; Layout Planning; Social Responsibility Criteria.

## 1. Introduction

In the current market conditions, characterized by the constant change of the product portfolio and the shortening of their life cycles, a frequent reconfiguration of the layout is necessary for the company to remain competitive. In this way, layout planning is an important practical problem for manufacturing companies (Gyulai et al., 2016). Due to the important significance of reducing production costs, installation layout planning is studied (Liu et al., 2017).

The layout of facilities must respect all design constraints, ie the boundaries of the site and its capabilities, so that it may be considered feasible (Hammad et al., 2017; Chraibi et al., 2016; Gonçalves & Resende; 2015). Tortorella & Fogliatto (2008) mention that the importance of the physical distribution of a process is reinforced by the long-term consequences of the decisions and the cost of redesigning the plant. In this sense, some studies developed in the literature seek to minimize the need for layout redesigning (Kulturel-Konak, 2017; Xiao et al., 2017; Papadaki & Chassiakos, 2016; Ulutas & Islier, 2015; Pourvaziri & Naderi, 2014; García-Hernández et al., 2013).

Layout planning involves arranging a certain amount of facilities. Where the total cost to move the material between the facilities during the production process is minimized (Liu et al., 2018; Kulturel-Konak, 2017; Xiao et al., 2017; Safarzadeh & Koosha, 2017; Kang & Chae, 2017; Paes, Pessoa & Vidal, 2017; Che, Zhang & Feng, 2017; Papadaki & Chassiakos, 2016; Izadinia & Eshghi, 2016; Wang et al., 2015; Ulutas & Islier, 2015; Niroomand et al., 2015; Pourvaziri & Naderi, 2014; Nasab, 2014; Mohan & Pillai, 2013; Manita & Korbaa, 2013; García-Hernández et al., 2013; Heragu & Kusiak, 1991). But to consider material handling only and exclusively has become obsolete. Layout planning goes beyond this simple concept, it involves reducing inventories in the process, lead time, use of existing space more effectively seeks to make the plant adaptable to future changes and provides a healthy, convenient and secure environment for employees. Raising productivity by determining an efficient arrangement of facilities within the organization (Ahmadi; Pishvae & Jokar, 2017). Layout planning also considers cost reduction related to available space (Liu et al., 2018; Xiao et al., 2017; Papadaki & Chassiakos, 2016; Wang et al., 2015; García-Hernández et al., 2013).

Decision-making is an important activity that usually involves several conflicting points of view (criteria) that must be considered together in order to arrive at a reasonable decision (Govindan & Jepsen, 2016). The Analytic Hierarchy Process (AHP) is a structural and hierarchical method of quantitative analysis. Although it has been used in social and economic fields, there are many other applications for this tool, such as layout planning (Li et al., 2016). Systematic Layout Planning (SLP) is a method that, from the flow of materials and the interrelationship between activities, systematizes a logic for the planning of layouts.

For the Facility Layout Problem (FLP) solution there are methods that involve a complex structuring, Figure 1 for example. These methods are used in cases that have the number of sectors greater than 50. These methods do not apply to the company under study, since the table has eleven sectors and, in addition, has restriction related to social responsibility, where redesign replanning occurs by the need to apply good manufacturing practices (GMP). Although this empirical concept presents greater complexity to be inserted in the traditional methods, Feng et al. (2017) suggest the incorporation of human characteristics/decisions as future research.

For layout planning, involving less complex methods, one has to adopt SLP. Authors such as, Fahad et al. (2017), Liu et al. (2016) and Ojaghi et al. (2015) apply this

method. Where Ojaghi et al. (2015) use this method in small and medium enterprises, but several tools to support planning and decision-making support it. Fahad et al. (2017) and Liu et al. (2016), use the SLP for energy management and installation of an alarm system in a nuclear power plant, respectively. And as a method of decision making, we have adopted the AHP for the layout planning or planning of ventilation systems, urban planning, airports, ports and facilities of railway lines (Besbes et al., 2017; Bersani et al., 2015; Kursunoglu & Onder, 2015; Lai et al., 2015; Zavadskas, Turskis & Bagočius, 2015; Al-Hawari, Mumani & Momani, 2014; Wey & Hsu, 2014). In this way, it is possible to combine these two methods for layout planning, the AHP as a decision-making tool for the SLP.

Due to the practical relevance of multi-criteria decision support and the challenges of modeling human thinking, contributing to transparent decision-making (Geldermann & Schöbel, 2011). Razmak & Aouni, (2015) believe that implementing the Multi-Criteria Decision Support System will increase management's performance in the decision-making process. In this way, this research contributes to the business sector by presenting the sequencing of a management/planning tool and a decision-making tool for the preparation of layouts, since it is a less complex method for layout planning with a reduced number of sectors, assisting managers in making decisions about this planning.

The development of this research was structured based on a technical study based on the tool for SLP planning, presenting possibilities of layouts, and, by multi-criteria methods for decision making, selecting the best proposal through the AHP. In this context, the objective of the present study is to analyze the contribution of AHP to SLP as a method of layout planning for company managers, involving social responsibility criteria. Thus, the research is divided into five sections, the first section introduced the objective of this research, the second presents the theoretical basis of this research, the third the method for layout planning by the SLP and AHP, the fourth demonstrates the results obtained and the fifth concludes with the final considerations.

## **2. Layout Planning**

The Facility Layout Problem (FLP) is the distribution of a number of facilities of equal size within a given space, finding the most efficient arrangement of a plant (machines and equipment) (Allahyari & Azab, 2017; Matusek, 2012; Drira; Pierreval & Hajri-Gabouj, 2007; Hani et Al., 2007; Heragu & Kusiak, 1991). For the FLP solution, there are methods that involve more or less complex structures (Figures 1 and 2). What helps to optimize process capability is plant planning, improving production time, productivity and efficiency (Drira et al., 2007). The layout is the work or installation plan (machines, tools, devices, etc.) required for the production process; is the disposition of employees, materials, machines and other manufacturing supports and facilities to create the ideal physical arrangement. The layout should be carefully planned in order to meet the requirements for the production and process demands. Layout planning is the fundamental basis of industrial plants and can directly influence the efficiency of work (Watanapa et al., 2011). Various layout design alternatives can be planned by considering multiple solutions of physical arrangements of manufacturing facilities, which lead to different advantages and disadvantages over one another. The decision to properly select a layout now becomes more complex due to the involvement of several conflicting criteria (Karande & Chakraborty, 2014). Various layout design alternatives can be planned by considering multiple solutions of physical arrangements of manufacturing facilities, which lead to different advantages and disadvantages over one another. The decision to

properly select a layout now becomes more complex due to the involvement of several conflicting criteria.

### Figure 1 - Complex methods for layout planning

Objectives: a. Minimize the distance between machines/sectors; b. Minimize the cost of handling materials; c. Minimize the cost of rearrangement; d. Minimize the cost of space; e. Minimize material flow. Restrictions: f. Area constraints; g. Position constraints; h. Cost constraints. The types of layouts are variations of the FLP, and their characteristics can be found in the articles found in the references of this article.

### Figure 2 - Methods of less complexity for layout planning

Common criteria: a. Flexibility; b. Accessibility; c. Expansion; d. Cost; e. Closeness; f. Human Issues.

#### 2.1. *Systematic Layout Planning*

Systematic Layout Planning (SLP) is a procedural approach to layout design, where the methodology involved in the execution is relatively simple; however, it is a proven tool in providing guidance in the design of physical arrangements in the last decades (Yang et al., 2000). The SLP System is a coordination of layout projects. It consists of a structure of phases, a model of procedures and a series of data for identification, evaluation, and visualization of the areas and elements involved in the planning. The flow of materials, for example, is a determining factor for the physical arrangement many times (Muther, 1978). The method can be defined as a flowchart of processes, inter-relating activities according to the needs of proximity/departure and the flow to be followed; thus being a logical systematization in layout planning. The methodology for the implementation is divided into activity relation diagram and dimensionless block diagram.

The activity relation diagram, also called the affinity analysis diagram, shows the relationships of each industry with any other department or area. Answering the following question: How important is this sector to be near another service facility? This questioning needs to be carried out in an indispensable way. In order to elaborate the importance of proximity, this questioning must be elaborated with the consent of several people who have a wide knowledge of the plant (Meyers & Stephens, 2005). The Activity Relationship Diagram is a triangular matrix that shows the degree of proximity between a certain activities in relation to others (Muther, 1978). Each department pair represents a specific adjacency class, subdivided into A (Absolutely important), E (Especially needed), I (Important), O (Unimportant), U (Negligible) and X (Undesirable) (De Carlo et al., 2013).

An intermediate step is the activity relation worksheet that serves to facilitate the understanding of the relationship diagram of activities/sectors, obtaining through it the basic data for the elaboration of the dimensionless diagram of blocks. The activity relation worksheet presents the same values obtained in the activity relation diagram; it is a transcript of data. Represents the first distribution and result attempt of the activity relation worksheet. Even if this distribution is dimensionless, it will be the basis for the main distribution plan and project design. Once the size of each sector has been determined, the spaces for each activity will be distributed through the distribution of the dimensionless block diagram (Meyers & Stephens, 2005).

The block diagram is the simplest method to represent a process. It consists in that each activity closes with a rectangle, after this, it connects with another indicating the flow of the material by arrows. In the layout representation, you usually start at the top right of the sheet (Urbina, 2001). After the flow analysis of the diagram is performed,

with the concept to demonstrate the path traveled by the materials in the distributed sectors. This analysis will ensure that the important relationships are maintained and that the distribution made sense; providing a correct flow of the material, avoiding that it crosses several sectors (Meyers & Stephens, 2005).

## 2.2. Analytic Hierarchy Process

Perhaps the most creative task in making a decision is to choose the factors that are important to that decision (Saaty, 1990). The decision-making process becomes increasingly complex and engaging. This process requires the aggregation of several immeasurable and conflicting dimensions (Razmak & Aouni, 2015). In the Analytic Hierarchy Process (AHP), these factors, once selected, are organized in a hierarchical structure that descends from a general objective to criteria, sub-criteria, and alternatives at successive levels (Saaty, 1990). The AHP provides greater simplicity in the modeling of the decision process (Ehrlich, 1996.). It is a method that applies mathematics to process the preferences of individuals or groups of decision makers. This method suggests the elaboration of hierarchies to make judgments. The evaluation criteria are measured at different scales (Colin, 2007). Gosende (2016) points out that AHP is one of the most widely used Multiple-Criteria Decision-Making (MCDM) tools in evaluating layouts. In assessing the importance of the criteria, the nine-point Saaty scale is used.

According Costa (2006) and Tortorella & Fogliatto (2008), the AHP method is based on three principles of analytical thinking. According to Colin (2007), to facilitate understanding, the application of the AHP method can be divided into four parts: 1) hierarchical representation, elaboration of the decision hierarchy in relation to the various levels of interrelated elements; 2) pair comparison, evaluation of preferences for each decision element at a given level of the hierarchy; 3) the eigenvalue method, to estimate the relative weights of the decision-making elements at a given level and to assess the consistency of the preferences stipulated in the pair comparisons; 4) aggregation of properties, how to evaluate the result related to the objective. Details on the calculation procedures can be obtained in Campos (2008).

## 3. Materials and Methods

The case study was conducted in a flexible packaging company. Data (time and material flow between sectors) were collected from the production process in the company's system to prepare the layout proposal. In addition, area managers were asked to understand the interrelationship between activities. Figure 3 presents the four phases to develop the present research.

Figure 3 - The global flow of the proposed model

In phase 1 we have a survey of the productive sectors/processes of the company, which were inserted in the layout proposal. Then, from the materials consumed in the production processes, the percentages of material sent to different sectors of the productive process of the company under analysis were identified.

In phase 2, the Systematic Layout Planning (SLP) tool is started. First, the relationship matrix of sectors was elaborated, aided by the relationship worksheet, to facilitate understanding during the process. Subsequently, the layout of the areas was identified according to the importance of proximity. This last process occurred by the

dimensionless distribution of blocks and, to facilitate the analysis of this step, the blocks were also defined according to the approximate sizes of each sector.

In phase 3, the criteria were defined to assist in decision making in order to choose the best-planned layout proposal, according to the SLP system. The measured values were transmitted in relation to their degree of importance comparing one with the other, proposal with proposal and criterion with a criterion. After defining each project attribute to be executed, it was stipulated the degree of importance, according to Saaty's fundamental scale, to compare criterion at criterion (Gosende, 2016). These comparisons are defined by measuring the distance between sectors and the evaluation of the possibility of expansion in relation to the current space. Each weight is expressed according to the table of values for analysis of the design of the new plant of the company. With the planning team, it is possible to define how each criterion is more important than the other is, how far the raw material goes to the final product and which of the proposals allow the increase of the number of machines to increase the productive capacity or new product lines. The values defined in this phase served to compare the best proposal to be planned. The Assistat software calculated the values of  $\lambda_{max}$ , CI (consistency index), RI (random-like matrix) and CR (consistency ratio). These values aided in verifying the reliability of the priorities defined and in the outcome of phase 4.

In phase 4 the best layout proposal was selected through a comparative analysis between the results of the AHP method. The AHP method was selected because it deals with the problem of choosing the best layout, where the inputs are given by paired comparisons and as output has a complete ranking of scores. The method allows with some effort to impute comparisons between qualitative and quantitative variables. Thus, the goal is to select an efficient layout that at the same time meets the quality standards and needs of the company. For the analysis of the data collected in the decision-making stage, Assistat statistical software (developed by Professor Francisco de A. S. e Silva of the Federal University of Campina Grande - UFCG, Brazil) was used. The values obtained by the Assistat software come from the formulas provided by the AHP method. After these steps, the software normalizes the matrix and simulates the values according to the formulas of the AHP method. According to the software, the RI values are tabulated and a re-evaluation of the comparison matrix may be necessary if the CR value is greater than 0.1 (Ramos, 2000; Saaty, 1980).

#### **4. Presentation and analysis of results**

This section presents and analyzes the results of the present study that aimed to analyze the contribution of Systematic Layout Planning (SLP) and Analytic Hierarchy Process (AHP) for layout planning in a flexible packaging company. To do so, it was divided into 3 sections: the flow of material between processes, layout design by SLP, and AHP decision making.

##### **4.1 Material flow**

The company to be analyzed has different production processes, being: extrusion, warehouse, printing, waxing, revision, metallization, lamination, rewinding, cutting and welding. These processes may or may not be linked directly to each other. All activities are in sequence, one dependent on the other, with the exception of some cases where the material is reworked on the same machine.

The extrusion sector of the company analyzed produces polyethylene (PE) and polypropylene (PP) coils that are sent to the warehouse sector in 100% of cases. The

warehouse sector, where the raw material is stored, sends the PE, PP, bi-oriented polypropylene (BOPP), polyester or polyethylene terephthalate (PET), paper and aluminum coils to the printing and laminating sectors. In some cases it sends for waxing, metallization, rewinding and cutting and welding, these occurrences are not very frequent, according to Table 1.

Table 1 - Percentage of material sent between sectors

Data from the printing, waxing, revision, metallization, lamination, rewinding, cutting and welding sectors were exported from the system according to the values provided by the production notes. The percentage survey came through the ratio of how much of the total production was sent to the next step, in this way each sector had a percentage of receiving the material produced in the previous step. For example, the wax machine received 8.03% of the material that came from Printing in the period from January/2014 to June/2015.

#### 4.2. Layout planning by Systematic Layout Planning

To develop the layout planning by the SLP, the activity relation diagram (relationship matrix of sectors) and the block diagram were first elaborated. Then, through the SLP method, two layouts were defined. The activity relation diagram has the function of presenting the level of importance or proximity of one sector to the other. For the elaboration of this diagram, a guide (Table 2) with code, description and the criteria with their respective percentages were defined, together with the production managers of the company under analysis.

Table 2 - Guide for the elaboration of the activity relation diagram

Looking at the guide, managers were able to define the importance when comparing sector with sector from the material flow (Table 1). With the production data collected, calculated and analyzed, one can define the activity relation diagram, Figure 4.

Figure 4 - Activity relation diagram

As shown in figure 3, the sectors were analyzed and coded and this process was repeated for the other sectors until the entire activity relation diagram was filled. If, on the one hand, it is absolutely important (code A - Table 2) the proximity of some sectors (extrusion and warehouse, warehouse and printing, printing and revision). On the other hand, the proximity between other sectors (metallization and waxing, waxing and rolling) is not desirable.

From the flow of materials and data collected in the activity relation diagram, the block diagram was elaborated to aid in the layout planning. This stage begins with the assembly of Table 3 showing the numbering in the respectively defined spaces. Once this step was completed, the layout simulations were started according to the criteria for assembly of the factory plant.

Table 3 - Block Diagram

Table 3 shows the activities surveyed and the proximity codes (numbers corresponding to the defined proximity in the comparison between the sectors by means of the data collected from the process flow). The 11 activities surveyed are represented in Figure 5 by means of the blocks. The proximity values were distributed in the center and in the corners according to the previous classification level. The tables do not have to represent the size that each sector must have, this process is optional for those who will plan a certain process.

Figure 5 - Blocks of each sector to layout planning

In this way, in the upper left corner the activities with the code "A" were arranged and in the right the tasks with the importance code "E". In the lower corners are distributed the relations of code "I" and "O", being left and right, respectively. The "U" code activities are omitted from the tables and in the center are the "X" relationships (below the activity number/name). Once the 11 activities are listed, you must distribute the steps that make up the company process so that you will more than satisfy the layout design and evaluate all planning possibilities. It starts with the most important activity of the production flow, allowing a flow coherent with the process, making it possible to simplify and optimize the plant.

Two layouts were defined through the SLP method: one with more centralized sectors (Figure 6) and the other one favoring decentralization (Figure 7). The arrows indicating the flows have the main chain; arrows due to the low impact do not represent activities.

Figure 6 - Centralized proposal

Figure 7 - Decentralized proposal

After presenting two initial proposals, a new provision was simulated, but with the approximate size of each sector (Figures 8 and 9). This new distribution allowed us to glimpse the space that each sector occupies and provided a reliable projection regarding the new reality of the company in the analysis. The transformation sectors had their spaces expanded, enabling the company to grow and the introduction of new machines. Finally, the company in question planned layout 5, Figure 10.

Figure 8 - Centralized proposal of layout allowing expansion

Figure 9 - Decentralized proposal of layout allowing expansion

Figure 10 - Proposal of the company under analysis

#### 4.3. Analytic Hierarchy Process and decision-making

When making the layout proposals for the new plant of the company in the analysis, will start the stage of simulation of the proposals obtained. These were simulated to obtain the most appropriate result according to the needs of the company. In addition, in order to define the best project, the evaluation criteria must be defined to demonstrate the degree of importance of one in relation to the other.

In consultation with the team responsible for the development of the new plant of the company under analysis, the following criteria were established to define the best layout proposal for the future installation of the new manufacturing plant: good manufacturing practices (GMP), ISO 22000, material flow and factory expansion. The Good Manufacturing Practices (GMP) criterion refers to the hygiene and cleaning practices practiced by all employees of the company, which facilitates the possibility of implementing ISO 22000, also promoted by the new factory project. The material flow has an important role in the expansion proposal since it must be in a logical way, avoiding excess movements, making the project more harmonic and linear. Finally, the expansion of space, compared to the current one, allows the increase of its production capacity, since there are spaces available for the installation of new machines and warehouse of intermediate product.

After defining each project attribute to be executed, the degree of importance was stipulated (Table 4). The GMP, ISO 22000 and factory expansion attributes were compared according to the importance of each other. Layouts 1 and 2 were established taking into account the current size of the company, layouts 3 and 4 aimed at the expansion and layout 5 was planned by the company. The flow attribute was measured (in meters) according to scales provided by the company's plans (current and planned).

Table 4 - Level of applicability of layouts between attributes

Layouts 3, 4 and 5 were defined as nine more important times (Table 4) (for the 4 attributes) due to the available space that will facilitate the implementation of these projects, for this reason, the other two proposals had smaller values. After analyzing the importance of one sector in relation to the other, we used the Assisat software to define the best layout proposal. When ordering the best layout obtained, we have the proposal provided by the Analytic Hierarchy Process - AHP, as shown in table 5.

Table 5 – Sorting of the best layout obtained

The results show that layout 4 is the one that best meets the needs of the company under analysis. Layout 2 has obtained an approximate result to that previously mentioned and, for this reason, it is possible to apply it as well. Already, layouts 5 and 1, because they have a very long flow of materials, have shown inferior results, since they do not meet the pre-established criteria.

When analyzing the results obtained by the application of the AHP method, an approximation of values between layouts 4 and 2, and 5 and 1 is observed. This approach case may generate doubt at the moment of implementing the best proposal, since if any value of the comparison criteria, this result may be different from that shown in table 5. When analyzing the GMP, ISO 22000 and plant expansion criteria together with management, it was noticed that the values were the same because they designed a new and thus all were given the same degree of importance at the time of the comparison.

In relation to the study developed by Besbes et al. (2017), one perceives an advantage in the use of a tool for layout planning (SLP), and instead of AHP, another decision-making tool, which acts as a decision maker, supports it. Already, regarding the finding of Al-Hawari, Mumani & Momani (2014), AHP remains an efficient tool in conjunction with SLP. Finally, on the research carried out by Ojaghi et al. (2015), the SLP needed a single tool for decision making, in the case of AHP.

## 5. Conclusion

The research presented a method for decision making of which better layout to plan, including the analysis of the efficiency of the same. To that end, a sequencing of management/planning tools was analyzed in conjunction with a multi-criteria analysis method. The objective was to analyze the contribution of Systematic Layout Planning (SLP) and the Analytic Hierarchy Process (AHP) for layout planning in a flexible packaging company.

The proposed method demonstrated the contribution of each phase in the development of this research. Phase 1 allowed for more interaction with the company's managers and provided the necessary information about the company's production process. In phase 2, SLP demonstrated its versatility in providing layouts proposals. Phase 3 has shown how important it is to use tools to aid decision making since the proposals provided by the SLP please different managers/people of the company. Therefore, it is necessary, through criteria, to decide a proposal, and that is the one that meets the needs of the business. Finally, phase 4 showed the current situation of the organization and the way it should follow to optimize the productive flow. Thus, this research has demonstrated that using a decision support method to plan layouts within a business environment can be beneficial. Due to the structured decision, it provides.

As for future research to improve this work, it is suggested to use other decision-making tools that can improve the proximity of results obtained (layouts 4/2 and 5/1) or to deepen the sensitivity analysis. In addition, it is suggested the adoption of metaheuristics for the optimization in the planning of layouts through algorithms. The adoption of algorithms for metaheuristics allows the insertion of multiple criteria, where these can reduce costs and provide a better delineation of the macro layout by planning the spaces between sectors and the correct size of the spaces that will be distributed by the physical arrangement.

## References

- Ahmadi, A.; Pishvae, M. S.; Jokar, M. R. A. (2017) A Survey on multi-floor facility layout problems. *Computers & Industrial Engineering*.
- Al-Hawari, T., Mumani, A., & Momani, A. (2014). Application of the Analytic Network Process to facility layout selection. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 488-497.
- Assistat. (2016). *Assistência Estatística*. Recuperado em 19 de maio de 2016, de <http://www.assistat.com/indexp.html>
- Baca, U. G. (2001). *Evaluación de proyectos*. McGraw-Hill.
- Bersani, C., Guerisoli, C., Mazzino, N., Sacile, R., & Sallak, M. (2015). A multi-criteria methodology to evaluate the optimal location of a multifunctional railway portal on the railway network. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 5(2), 78-91.
- Besbes, M., Affonso, R. C., Zolghadri, M., Masmoudi, F., & Haddar, M. (2017). Multi-criteria decision making for the selection of a performant manual workshop layout: a case study. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 12404-12409.
- Campos, A. J. D. M. (2009). *Análise de critérios de decisão em estratégia de arranjos produtivos locais: um estudo aplicando o processo de hierarquia analítica (AHP) no setor de cerâmica* (Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).

- Che, A., Zhang, Y., & Feng, J. (2017). Bi-objective optimization for multi-floor facility layout problem with fixed inner configuration and room adjacency constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 105, 265-276.
- Chraïbi, A., Kharraja, S., Osman, I. H., & Elbeqqali, O. (2016). A particle swarm algorithm for solving the multi-objective operating theater layout problem. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1169-1174.
- Colin, E. C. (2007). *Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas*. Livros Técnicos e Científicos.
- Costa, H. G. (2006). Auxílio multicritério à decisão: método AHP. *Rio de Janeiro: Abepro*.
- De Carlo, F., Arleo, M. A., Borgia, O., & Tucci, M. (2013). Layout design for a low capacity manufacturing line: a case study. *International Journal of Engineering Business Management*, 5, 35.
- Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 255-267.
- Ehrlich, P. J. (1996). Modelos quantitativos de apoio as decisões: II. *Revista de Administração de Empresas*, 36(2), 44-52.
- Fahad, M., Naqvi, S. A. A., Atir, M., Zubair, M., & Shehzad, M. M. (2017). Energy Management in a Manufacturing Industry through Layout Design. *Procedia Manufacturing*, 8, 168-174.
- Feng, H., Da, W., Xi, L., Pan, E., & Xia, T. (2017). Solving the integrated cell formation and worker assignment problem using particle swarm optimization and linear programming. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 126-137.
- García-Hernández, L., Pierreval, H., Salas-Morera, L., & Arauzo-Azofra, A. (2013). Handling qualitative aspects in unequal area facility layout problem: An interactive genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 13(4), 1718-1727.
- Geldermann, J., & Schöbel, A. (2011). On the similarities of some multi-criteria decision analysis methods. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 18(3-4), 219-230.
- Gerhardt, T. E., & Silveira, D. T. (2009). *Métodos de pesquisa*. Plageder.
- Gil, A. C. (2002). Como elaborar projetos de pesquisa. *São Paulo*, 5(61), 16-17.
- Gonçalves, J. F., & Resende, M. G. (2015). A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 246(1), 86-107.
- Gosende, P. A. P. (2016). Evaluación de la distribución espacial de plantas industriales mediante un índice de desempeño. *Revista de Administração de Empresas*, 56(5), 533-546.
- Gyulai, D., Szaller, Á., & Viharos, Z. J. (2016). Simulation-based Flexible Layout Planning Considering Stochastic Effects. *Procedia CIRP*, 57, 177-182.
- Hafiz, F., & Abdennour, A. (2016). Particle Swarm Algorithm variants for the Quadratic Assignment Problems-A probabilistic learning approach. *Expert Systems with Applications*, 44, 413-431.
- Hammad, A. W., Rey, D., & Akbarnezhad, A. (2017). A cutting plane algorithm for the site layout planning problem with travel barriers. *Computers & Operations Research*, 82, 36-51.
- Hani, Y.; Amodeo, L.; Yalaoui, F.; Chen, H. (2007). Ant Colony optimization for solving an industrial layout problem. *European Journal of Operational Research*, v. 183, n. 2, p. 633-642.

- Heragu, S. S.; Kusiak, A. (1991). Efficient models for the facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, v. 53, n. 1, p. 1–13.
- Izadinia, N., & Eshghi, K. (2016). A robust mathematical model and ACO solution for multi-floor discrete layout problem with uncertain locations and demands. *Computers & Industrial Engineering*, 96, 237-248.
- Jia, Q., & Seo, Y. (2013). Solving resource-constrained project scheduling problems: conceptual validation of FLP formulation and efficient permutation-based ABC computation. *Computers & Operations Research*, 40(8), 2037-2050.
- Kang, S., & Chae, J. (2017). Harmony search for the layout design of an unequal area facility. *Expert Systems with Applications*, 79, 269-281.
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2014, January). A facility layout selection model using MACBETH method. In *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, January* (pp. 7-9).
- Kulturel-Konak, S. (2017). A Matheuristic Approach for Solving the Dynamic Facility Layout Problem. *Procedia Computer Science*, 108, 1374-1383.
- Kursunoglu, N., & Onder, M. (2015). Selection of an appropriate fan for an underground coal mine using the Analytic Hierarchy Process. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 48, 101-109.
- Lai, P. L., Potter, A., Beynon, M., & Beresford, A. (2015). Evaluating the efficiency performance of airports using an integrated AHP/DEA-AR technique. *Transport Policy*, 42, 75-85.
- Li, M. K., Liu, Y. K., Peng, M. J., Xie, C. L., & Yang, L. Q. (2016). The decision making method of task arrangement based on analytic hierarchy process for nuclear safety in radiation field. *Progress in Nuclear Energy*, 93, 318-326.
- Liu, K. H., Hwang, S. L., Hsieh, M. H., Liang, S. F. M., & Chuang, C. F. (2016). Systematic layout planning in human–system interface: An evaluation of alarm displays with spatial proximity for accidents diagnosis of advanced boiling water reactor. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 51, 30-42.
- Liu, J., Wang, D., He, K., & Xue, Y. (2017). Combining Wang–Landau sampling algorithm and heuristics for solving the unequal-area dynamic facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 262(3), 1052-1063.
- Liu, J., Zhang, H., He, K., & Jiang, S. (2018). Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on objective space division for the unequal-area facility layout problem. *Expert Systems with Applications*, 102, 179-192.
- Manita, G., & Korbaa, O. (2013). A hybrid genetic algorithm for solving machine layout problem with consideration of industrial constraints. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 2039-2044.
- Matusek, M. (2012). Layout Planning: A Case Study on Engineering-to-Order Company. In *Jeseník, Republica de Checoslováquia, União Europeia: Carpathian Logistic Congress–CLC* (pp. 7-9).
- Moghadasi, A., Sarwat, A., & Guerrero, J. M. (2016). Multiobjective optimization in combinatorial wind farms system integration and resistive SFCL using analytical hierarchy process. *Renewable Energy*, 94, 366-382.
- Mohan, T. K., & Pillai, V. M. (2013). Detailed Dynamic Layout Planning: An Adaptive Layout Approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 2027-2032.

- Muther, R. (1978). Planejamento do Lay-Out. *Sistema SLP. São Paulo. Ed. Edgard Blucher.*
- Nasab, H. H. (2014). A hybrid fuzzy-GA algorithm for the integrated machine allocation problem with fuzzy demands. *Applied Soft Computing*, 23, 417-431.
- Niroomand, S., Hadi-Vencheh, A., Şahin, R., & Vizvári, B. (2015). Modified migrating birds optimization algorithm for closed loop layout with exact distances in flexible manufacturing systems. *Expert Systems with Applications*, 42(19), 6586-6597.
- Ojaghi, Y., Khademi, A., Yusof, N. M., Renani, N. G., & bin Syed Hassan, S. A. H. (2015). Production layout optimization for small and medium scale food industry. *Procedia Cirp*, 26, 247-251.
- Paes, F. G., Pessoa, A. A., & Vidal, T. (2017). A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 256(3), 742-756.
- Papadaki, I. N., & Chassiakos, A. P. (2016). Multi-objective construction site layout planning using genetic algorithms. *Procedia engineering*, 164, 20-27.
- Pourvaziri, H., & Naderi, B. (2014). A hybrid multi-population genetic algorithm for the dynamic facility layout problem. *Applied Soft Computing*, 24, 457-469.
- Razmak, J., & Aouni, B. (2015). Decision Support System and Multi-Criteria Decision Aid: A State of the Art and Perspectives. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 22(1-2), 101-117.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Safarzadeh, S., & Koosha, H. (2017). Solving an extended multi-row facility layout problem with fuzzy clearances using GA. *Applied Soft Computing*, 61, 819-831.
- Silva, F. A. (1996). The ASSISTAT Software: statistical assistance. In *International conference on computers in agriculture* (Vol. 6, pp. 294-298). Cancun: American Society of Agricultural Engineers.
- Stephens, M. P., & Meyers, F. E. (2013). *Manufacturing facilities design and material handling*. Purdue University Press.
- Tortorella, G. L., & Fogliatto, F. S. (2008). Planejamento sistemático de layout com apoio de análise de decisão multicritério. *Production*, 18(3), 609-624.
- Ulutas, B., & Islier, A. A. (2015). Dynamic facility layout problem in footwear industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 55-61.
- Yang, T., Su, C. T., & Hsu, Y. R. (2000). Systematic layout planning: a study on semiconductor wafer fabrication facilities. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(11), 1359-1371.
- Wang, S., Zuo, X., Liu, X., Zhao, X., & Li, J. (2015). Solving dynamic double row layout problem via combining simulated annealing and mathematical programming. *Applied Soft Computing*, 37, 303-310.
- Watanapa, A., Kajondecha, P., Duangpitakwong, P., & Wiyaratn, W. (2011). Analysis Plant Layout Design for Effective Production. In *International Multiconference of Engineers and Computer scientists (IMECS 2011) Vol II, Hong Kong.*

- Wey, W. M., & Hsu, J. (2014). New urbanism and smart growth: Toward achieving a smart National Taipei University District. *Habitat International*, 42, 164-174.
- Wiyaratn, W., & Watanapa, A. (2014). Study on Basket Document Factory Plant Layout for Proficient Production. In *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists* (Vol. 2).
- Weil, K. E. (1979). Planejamento do layout, sistema SLP. *Revista de Administração de Empresas*, 19(3), 103-104.
- Xiao, Y., Xie, Y., Kulturel-Konak, S., & Konak, A. (2017). A problem evolution algorithm with linear programming for the dynamic facility layout problem—A general layout formulation. *Computers & Operations Research*, 88, 187-207.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Bagočius, V. (2015). Multi-criteria selection of a deep-water port in the Eastern Baltic Sea. *Applied Soft Computing*, 26, 180-192.

## Tables

Table 1 - Percentage of material sent between sectors

Printing - Product Flow		Quantity (kg)	Percentage
Printing → Waxing		462.067,00	8,03%
Printing → Rewinding		1.610.763,87	27,96%
Printing → Revision		3.686.898,80	64,01%
<b>Total</b>	=	<b>5.760.135,07</b>	<b>100,00%</b>

Revision - Product Flow		Quantity (kg)	Percentage
Revision → Expedition		2.049,00	0,06%
Revision → Printing		12.357,00	0,34%
Revision → Rewinding		19.761,80	0,54%
Revision → Metallization		1.603.817,50	43,50%
Revision → Lamination		2.048.913,50	55,57%
<b>Total</b>	=	<b>3.686.898,80</b>	<b>100,00%</b>

Metallization - Product Flow		Quantity (kg)	Percentage
Metallization → Expedition		117,00	0,01%
Metallization → Printing		2.325,90	0,15%
Metallization → Cutting and Welding		427.244,40	26,64%
Metallization → Lamination		616.654,80	38,45%
Metallization → Rewinding		557.475,40	34,76%
<b>Total</b>	=	<b>1.603.817,50</b>	<b>100,00%</b>

Lamination - Product Flow		Quantity (kg)	Percentage
Lamination → Printing		112.808,12	2,80%
Lamination → Rewinding		3.921.289,41	97,20%
<b>Total</b>	=	<b>4.034.097,53</b>	<b>100,00%</b>

Rewinding - Product Flow		Quantity (kg)	Percentage
Rewinding → Lamination		1.404,70	0,02%
Rewinding → Printing		2.721,80	0,04%
Rewinding → Cutting and Welding		2.168.242,60	33,63%
Rewinding → Expedition		4.274.865,07	66,31%
<b>Total</b>	=	<b>6.447.234,17</b>	<b>100,00%</b>

Waxing - Product Flow		Quantity (MI)	Percentage
Waxing → Rewinding		372.355,77	100,00%
<b>Total</b>	=	<b>372.355,77</b>	<b>100,00%</b>

Cutting and Welding - Product Flow		Quantity (MI)	Percentage
Cutting and Welding → Expedition		710.116,18	100,00%
<b>Total</b>	=	<b>710.116,18</b>	<b>100,00%</b>

Table 2 - Guide for the elaboration of the activity relation diagram

Code	Label	Criteria
A	Absolutely important	$060\% \leq X \leq 100\%$
E	Especially needed	$050\% \leq X < 060\%$
I	Important	$030\% \leq X < 050\%$
O	Unimportant	$005\% \leq X < 030\%$
U	Negligible	$000\% < X < 005\%$
X	Undesirable	0%

Table 3 - Block Diagram

Activities	A	E	I	O	U	X
1. Extrusion	2					3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11
2. Warehouse	1, 3, 7 e 11	6	5, 8 e 9	4 e 10		
3. Printing	2 e 4			6 e 8	10	1, 5, 7, 9 e 11
4. Revision	3	7	5	2	10	1, 6, 8, 9 e 11
5. Metallization			4, 7 e 8	9	10	1, 2, 3, 6 e 11
6. Waxing	8	2		3		1, 4, 5, 7, 9, 10, 11
7. Lamination	2 e 8	4	5			1, 3, 6, 9, 10, 11
8. Rewinding	7 e 10		2, 5 e 9	3		1, 4, 6 e 11
9. Cutting and Welding	10		8	5		1, 3, 4, 6, 7 e 11
10. Packing (Exped.)	8, 9 e 11			2	3, 4 e 5	1, 6 e 7
11. Storage (Exped.)	2 e 10					1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9

Table 4 - Level of applicability of layouts between attributes

Layout	GMP	ISO 22000	Flow	Expansion
Layout 1 - Decentralized proposal (current size)	5	3	194	1
Layout 2 - Centralized proposal (current size)	5	3	150	1
Layout 3 - Centralized proposal (expansion)	9	9	302	9
Layout 3 - Decentralized proposal (expansion)	9	9	242	9
Layout 5 - Proposal of the company under analysis	9	9	368	9

Table 5 – Sorting of the best layout obtained

Layout 4	0,2466
Layout 2	0,2436
Layout 3	0,1949
Layout 5	0,1576
Layout 1	0,1572

# Layout Planning for Small and Medium Enterprises: An Analysis from Systematic Layout Planning and Particle Swarm Optimization

Lucas Schmidt Goecks<sup>a,1</sup>, André Luis Korzenowski<sup>a,1</sup>

<sup>a</sup>*Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), PPG Industrial Engineering and Systems*

---

## Abstract

As one of the most important activities in production engineering, facility planning consists of making decisions regarding the layout of the sectors, production/manufacturing units, storage locations, and so on. This concept is supported by the variability of production processes, which changes from one period of production to another and from one company to another. Currently, the literature presents approaches of how to solve the problem of layout for small and medium-sized companies with models of planning, and decision-making multi-criteria, or meta-heuristics. The literature addresses these two methods separately. In fact, there are no reports of comparisons between them since the knowledge of the author. In response to this research gap, the following objective was defined: "to identify a method for layout planning applicable to small and medium-sized enterprises". The objective was to develop a generic modeling tool that meets different needs. Thus, this work approached Systematic Layout Planning (SLP) and Particle Swarm Optimization (PSO) for the layout planning, evaluating the best proposal by the Analytic Hierarchy Process (AHP). Because of practical interests that aim at the application of tools for the solution of specific problems, this work is classified as applied research of quantitative approach, based on processes of decision-making and modeling. The results obtained demonstrate that SLP provides better layout proposals than the PSO, for small and medium enterprises. The SLP respects the adjacent allocation of the sectors according to the material flow, while the PSO randomly distributes the productive areas, which provides greater variability in the layout proposals. The SLP required greater planning time and an auxiliary method (AHP) to define the best layout proposal. The PSO provided the best layout without a support tool and the simulation was faster after structuring the algorithm model. Practical implications of this research lie in the analysis of cost reduction with real data. Optimization objectives and constraints that are more usual have been identified in the literature. As for the type of layout, according to the characteristics of the company, and because it is a single case study, the job-shop type will be considered. This research contributes to the academic environment in the context of synthesizing two distinct methods for planning layouts and comparing them with a multi-criteria decision-making tool. In the business environment, it provides methods that can be incorporated into companies' day-to-day planning and planning.

*Keywords:* Layout Planning, Systematic Layout Planning, Particle Swarm Optimization, Small and

## 1. Introdução

Como uma das atividades mais importantes na engenharia de produção, o planejamento de instalações consiste na tomada de decisões relativas ao leiaute dos setores, unidades de produção/fabricação, locais de armazenamento, e assim por diante [27]. O planejamento de leiaute envolve o arranjo de uma determinada quantidade de instalações, onde o custo total para mover o material durante o processo produtivo seja minimizado [43, 37, 69, 60, 36, 55, 11, 56, 32, 67, 66, 53, 57, 52, 51, 45, 20, 29]. Além do manuseio de materiais, o planejamento de leiautes envolve a redução de estoques em processo, o *lead time*, o uso do espaço existente de forma mais eficaz, procura tornar a planta adaptável às mudanças futuras, e proporciona um ambiente saudável, conveniente e seguro para os funcionários [1]. Por consequência, este também considera a redução de custo relacionada ao espaço total disponível [43, 69, 56, 67, 20]. Desta maneira, garante o aumento da produtividade pela determinação de um arranjo eficiente das instalações dentro da organização [1]. Sendo este um problema de otimização encontrado em muitas organizações de manufatura e serviços [48]. Em termos de complexidade computacional, o planejamento de leiaute é categorizado em classe NP-completo [1, 15, 9].

A saída de um projeto de leiaute de instalação é uma estrutura de blocos, que especifica a localização relativa de cada departamento/setor. Permitindo assim, realizar mais trabalhos para obter o leiaute detalhado, que especifica locais exatos de cada departamento/setor, corredores e pontos de entrada e saída de materiais [47]. Como métodos para solução deste, [8, 2, 10] dão um destaque para as ferramentas multicritérios de tomada de decisão. Por outro lado, [44, 54] utilizam o *Systematic Layout Planning* para planejamento das propostas de leiautes. Outro método para planejamento encontra-se nas pesquisas de [20, 33, 45, 51, 52, 57, 23, 53, 66, 67, 5, 13, 24, 32, 56, 55, 11, 26, 36, 60, 69, 37, 18, 43], onde são apresentados vários algoritmos meta-heurísticos utilizados nos últimos cinco anos para a solução do *facility layout problem* (FLP). [40] destacam que os algoritmos heurísticos que solucionam o problema de leiaute devem: (i) produzir soluções de boa qualidade; (ii) ter exigência computacional muito baixa, isto é, baixa memória e tempo de computação; (iii) ser capaz de resolver problemas com instalações de áreas iguais e desiguais, proporcionando flexibilidade ao usuário em relação à configuração das instalações; ou seja, fornecem bons resultados para solução de problemas de planejamento de leiaute.

Desta maneira, a literatura apresenta abordagens de como solucionar o problema de leiaute pelos métodos SLP (menor complexidade), em conjunto das ferramentas para tomada de decisão, ou meta-heurísticos (maior complexidade), porém de forma separada. [65] destacam esta lacuna de pesquisa e sugerem o uso de algoritmos para múltiplos critérios no planejamento de leiaute, tal como uma comparação com o método proposto

no artigo. [34] complementam que o uso de algoritmos de otimização auxiliam os usuários na tomada de decisões, ou seja, na seleção da melhor proposta. As pesquisas envolvendo o planejamento de leiaute podem se concentrar em modelos mais realistas de otimização e tratar de problemas com um número maior de restrições (melhorando a confiabilidade da resposta), sendo necessário a aplicação em múltiplos casos para validação do método proposto [16, 38, 28]. Em complemento, [15] apontam que quando se trata de situações com vários objetivos, autores sugerem a aplicação do método AHP e de ferramentas da computação para otimização e generalização do planejamento de leiaute. Sendo assim, o intuito deste trabalho é estruturar e comparar dois métodos aplicáveis em distintos processos produtivos, que permitam a entrada de dados com características, produtos e volumes diferentes. Desta maneira, desenvolvendo uma ferramenta de modelagem genérica e que atenda à diferentes necessidades. Seguindo esta lacuna, fica exposta a seguinte questão de pesquisa: qual método de modelagem utilizar para o planejamento de leiautes em indústrias de pequeno e médio porte? Sendo assim, para esta lacuna, tem-se o seguinte objetivo: identificar um método para planejamento de leiautes aplicável em empresas de pequeno e médio porte. Para tanto, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos: (I) Identificar as estratégias de planejamento de leiaute utilizadas em trabalhos aplicados da literatura; (II) Escolher entre os modelos identificados aqueles que apresentam melhores condições de atuar em empresas de pequeno e médio porte; e (III) Avaliar os resultados da aplicação das ferramentas por meio de um modelo de análise de decisão multicriterial.

Devido à esta lacuna, nas pesquisas desenvolvidas por [60, 66], onde os autores aplicam algoritmos genéticos e *simulated annealing*, estes sugerem que o pesquisador examine outras meta-heurísticas para possíveis melhorias das soluções de leiaute geradas por eles. Sendo assim, pelas meta-heurísticas, [24] sugerem a aplicação do *Particle Swarm Optimization* (PSO) com heurísticas de melhoramento. Inclusive, um algoritmo PSO que necessite de um número menor parâmetros [57]. Desta maneira o algoritmo proposto pelo autor deve apresentar uma estruturação de modelos mais realísticos [32].

Vale ressaltar que o custo do manuseio de materiais representa de 20% a 50% do total de despesas operacionais em ambientes de fabricação [1, 63, 14, 30, 15, 35, 64, 19]. Onde custo de movimentação do material está diretamente ligado com a distância entre setores, podendo este ser melhorado através de um planejamento eficaz de leiaute [1, 35]. Esses custos poderiam ser reduzidos de 10% a 30% ao ano com um planejamento eficiente das instalações [63, 14]. Sob este ponto de vista, o trabalho contribui no sentido de entregar um modelo para otimizar a instalação de novas plantas produtivas. A fim de proporcionar a redução das perdas associados a movimentações. Facilitando a supervisão de pessoas e distribuição de máquinas e equipamentos.

Devido à relevância prática do apoio à decisão de múltiplos critérios, e aos desafios da modelagem do pensamento humano, contribuindo para a tomada transparente de decisões [21]. [59] acreditam que a implementação de um sistema de apoio a decisão multicritério (*Multi-Criteria Decision Support System*) aumentará o desempenho da gerência no processo de tomada de decisões. Desta maneira, esta pesquisa contribui para o

setor empresarial apresentando o sequenciamento de uma ferramenta de gestão/planejamento com outra de tomada de decisão para a seleção da proposta de leiaute. Bem como com dois métodos para o planejamento de leiautes com um número reduzido de setores.

70 O restante desta pesquisa é dividida em mais 4 capítulos. No capítulo 2 serão apresentados os conceitos envolvendo o planejamento de leiaute. A metodologia que envolve o desenvolvimento deste projeto encontra-se descrita no capítulo 3. E os capítulos 4 e 5 apresentam os achados e a conclusão desta, respectivamente.

## 2. Planejamento de leiaute

Como uma das atividades mais importantes na engenharia de produção, o planejamento de instalações  
75 consiste na tomada de decisões relativas ao leiaute dos setores, unidades de produção/fabricação, locais de armazenamento, e assim por diante [27]. O leiaute de uma instalação é o arranjo de tudo o que é necessário para a produção de bens ou a entrega de serviços. Uma instalação é uma entidade que facilita o desempenho de qualquer trabalho. Pode ser uma máquina-ferramenta, um centro de trabalho, uma célula de fabricação, uma oficina de máquinas, um departamento, um armazém, etc. [15].

80 O problema de leiaute de instalação (*Facility Layout Problem* - FLP) é a distribuição de um determinado número de facilidades de tamanho não igual dentro de um determinado espaço, encontrando o arranjo mais eficiente de uma planta (máquinas e equipamentos) [3, 15, 28]. A colocação das instalações na área da planta é conhecida por ter um significativo impacto sobre os custos no planejamento de leiaute [15, 28]. O planejamento de leiaute busca reduzir o custo no manuseio de materiais, o trabalho em processo e o *lead time*, a utilização  
85 mais eficaz do espaço existente, tornar a planta adaptável às mudanças futuras, proporcionar um ambiente saudável, conveniente e seguro para os funcionários e aumentar a produtividade através da determinação de um arranjo eficiente (leiaute) das instalações necessárias dentro da organização [1]. Tradicionalmente, as pesquisas sobre o planejamento de leiaute tratam dos departamentos/setores, áreas e fluxos [12].

Um bom plano de leiaute leva em consideração a melhor utilização das máquinas, a qualidade dos equipa-  
90 mentos, a eficiência do *setup*, um menor estoque de materiais e o custo de movimentação [3]. Vale ressaltar que o custo do manuseio de materiais representa de 20% a 50% das despesas operacionais totais em ambientes de fabricação[1, 27]. De um modo geral, o planejamento eficiente do leiaute oferece duas vantagens principais: (1) Redução entre 30% e 70% no custo total de manuseio de materiais e (2) projeto de longo prazo, pois evita despesas, como encerrar a produção, perdas de tempo de processo e assim por diante [3]. O custo do  
95 manuseio de materiais depende principalmente da quantidade do fluxo de materiais e das distâncias entre setores [1].

Nos atuais ambientes de fabricação, a volatilidade é quem determina as metas comerciais [12]. Sob um ambiente volátil, a demanda não é estável. Ela muda de um período de produção para outro. Para operar de forma eficiente em tais ambientes, as instalações devem ser adaptáveis aos requisitos de produção. Do ponto

100 de vista do leiaute, esta situação requer a solução por métodos heurísticos. Sabe-se que os procedimentos clássicos de otimização não são adequados para esse problema. Portanto, várias heurísticas, incluindo pesquisa tabu (*tabu search*), recozimento simulado (*simulated annealing*) e algoritmo genético (*genetic algorithm*), são aplicadas a este problema para encontrar uma boa solução, incluindo o algoritmo de colônia de formigas (*ant colony optimization*) [6].

105 A escolha da melhor configuração de leiaute da instalação é claramente uma decisão a ser feita durante a fase inicial do projeto, mesmo que possa ser modificada durante uma fase de redesenho devido a, por exemplo, uma extensão da planta. Devido as diferentes propriedades de um processo de fabricação - principalmente, a capacidade produtiva e a variedade de produtos - as estações de trabalho devem ser organizadas e planejadas adequadamente. [14] apresenta uma estrutura esquemática em sua pesquisa e destaca a presença de quatro  
110 tipos de leiaute, posição fixa, *job-shop*, celular e fluxo.

A classificação apresentada por [14], é apenas o passo inicial na identificação das possíveis configurações de leiaute de instalação, para um determinado plano de fabricação. O desenvolvimento da melhor e mais adequada configuração de leiaute, na verdade, geralmente é feito com alguma técnica específica em que muitos outros parâmetros são considerados, como as relações entre as diferentes estações de trabalho, problemas em  
115 sua proximidade, etc. Normalmente, autores trabalham com determinados objetivos e restrições para o planejamento de leiautes. O Quadro 1 representa um síntese das principais características adotadas nos últimos cinco anos.

Para resumir as características do planejamento de leiaute, [15] compacta todos estes estudos em sua pesquisa que revisa a literatura sobre FLP. O autor apresenta os sistemas de manufatura, ou seja, os quatro  
120 tipos de leiaute, fixo, por processo, por produto e celular. Onde a forma de instalação destes pode ser regular (proporcional) ou irregular. O sistema de movimentação do material dependerá da configuração do leiaute, sendo em linha única/múltiplas, de *loop*, a céu aberto ou com vários andares. E sua movimentação ao longo do fluxo pode ser por dispositivos e com/sem retrocesso. Quanto ao objetivo de planejar o leiaute, tem-se por meta minimizar, custos com espaços, movimentações e replanejamentos, retrocesso/desvio, congestionamento  
125 de tráfego e irregularidades de forma. Onde as restrições estão relacionadas com a área (do espaço alocado e a localização das instalações), com o posicionamento (folga entre as instalações, orientação, pontos de coleta/entrega e sem sobreposição) e com as despesas envolvidas.

Para o planejamento de leiaute, envolvendo métodos menos complexos, tem-se a adoção do *Systematic Layout Planning* (SLP) [17, 44, 54]. Onde [54] utilizam este método em empresas de pequeno e médio  
130 porte, porém o mesmo é sustentado por várias ferramentas de apoio ao planejamento e decisão. Já [17, 44] utilizam o SLP para a gestão de energia e instalação de um sistema de alarmes em uma planta de energia nuclear, respectivamente. E como método de tomada de decisão (Quadro 2), tem-se a adoção do *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para a seleção das propostas de leiautes ou planejamento de sistemas de ventilação, urbanismo, aeroportos, portos e instalações de linhas de trens [8, 7, 39, 42, 72, 2, 68]. Desta maneira, faz-se

Table 1: Objetivos e restrições no planejamento de leiautes

<i>Autor</i>	<i>Tipo de leiaute</i>	<i>Objetivos</i>					<i>Restrições</i>		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
[20]	UA - FLP		x	x	x				x
[33]	FLP	x							x
[45]	Loop LP	x	x				x	x	
[51]	DPLP + NADL		x						x
[52]	IMALP		x						x
[57]	DFLP		x	x				x	
[23]	UA - FLP	x					x		
[53]	Closed Loop LP		x					x	
[66]	DFLP		x	x				x	
[67]	DDRLP	x				x		x	
[13]	OTL		x				x		
[24]	QAP - FLP					x		x	
[32]	UMFDLP		x					x	
[56]	CSLP		x	x	x				x
[55]	UA - FLP	x	x				x	x	
[11]	Multi-Floor FLP	x	x				x	x	
[26]	SLPP		x					x	
[36]	UA - FLP		x				x		
[60]	MRFLP		x	x			x	x	
[69]	DFLP		x	x	x		x		
[37]	DFLP		x	x				x	
[18]	ICFWAP	x						x	
[43]	UA-FLP	x	x		x		x	x	x
<b>23 artigos de 2013 à 2018</b>	<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>18</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>6</b>

Objetivos: a. Minimizar a distância entre máquinas/setores; b. Minimizar o custo de manuseio de materiais; c. Minimizar o custo de rearranjo; d. Minimizar o custo do espaço; e. Minimizar o fluxo de material. Restrições: f. área; g. posição; h. custo.

135 possível a união destes dois métodos para o planejamento de leiautes, o AHP como ferramenta de tomada de decisão para o SLP.

Table 2: *Analytic Hierarchy Process* para planejamento de cenários

<i>Autor</i>	<i>Ano</i>	<i>Método</i>	<i>Crítérios comuns</i>					
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
[2]	2014	ANP	x	x	x		x	x
[7]	2015	AHP		x				
[8]	2017	AHP & TOPSIS		x	x	x	x	x
[39]	2015	AHP	x			x		
[42]	2015	AHP & DEA		x	x			
[68]	2014	FDM & AHP	x	x			x	
[72]	2015	AHP & ARAS-F		x		x		

Principais critérios: a. flexibilidade; b. acessibilidade; c. expansão;  
d. minimizar custo; e. proximidade; f. fatores humanos.

Em contrapartida, para a solução do *facility layout problem* (FLP), existem métodos que envolvem uma estruturação mais complexa/robusta, [43, 55, 11, 26, 36, 60, 69, 37, 18, 5, 13, 24, 32, 56, 67, 66, 53, 23, 57, 52, 51, 45, 33, 20]. Estes métodos são empregados em empresas de pequeno, médio e grande porte. Apesar deste conceito empírico apresentar maior complexidade para ser inserido nos métodos tradicionais, [18] sugerem a  
140 incorporação de características/decisões humanas como pesquisas futuras.

### 2.1. Estudos correlatos

Pelas meta-heurísticas, tem-se o *Particle Swarm Optimization* (PSO) como método para planejamento de leiautes. Autores como [13, 24, 18, 43], aplicaram este método para o desenvolvimento do FLP. O problema de  
145 *Operating Theater Layout* (OTL) multi-objetivo, apresentado por [13], consistia na alocação de determinadas áreas em um diferentes seções de um departamento de sala cirurgica. O problema OTL procurava encontrar um leiaute de instalações em um departamento hospitalar em conformidade com os padrões internacionais de credenciamento de assistência médica. Os principais objetivos foram, minimizar os custos totais de viagem entre instalações e maximizar as adjacências entre eles. O artigo apresentou uma formulação matemática  
150 para determinar o OTL ótimo pelo PSO. Já [24], estudaram um problema de atribuição quadrática (QAP). Estes destacaram que o PSO provou ser muito eficaz em várias aplicações, e que recebeu pouca atenção nessa frente. Neste artigo, uma nova abordagem baseada em probabilidade foi proposta para o PSO. O estudo realizado pelos autores revelou que a técnica proposta é efetiva. E estes ainda sugerem o desenvolvimento de um novo algoritmo PSO. Enquanto que, [18] pesquisaram sobre a manufatura celular, envolvendo o *design* das  
155 células e questões humanas como fatores importantes para sua implementação. Desenvolveram um modelo

linear para determinar a alocação ideal de máquinas, peças e trabalhadores. As características específicas desse modelo incluíram o planejamento de produção, a coexistência de roteiros de processos alternativos, divisão de lote, balanceamento de carga de trabalho entre células e atribuição de trabalho à várias células. Este artigo propôs uma abordagem híbrida combinando otimização da nuvem de partículas e programação linear (CPSO-LP) para resolver eficientemente problemas reais. Por fim, o FLP foi considerado por [43] para instalações de áreas desiguais (UA-FLP). Os objetivos deste problema visavam otimizar o custo de manuseio de material, a adjacência dos setores e maximizar a utilização do chão-de-fábrica. Neste artigo, os autores apresentaram uma hibridização do PSO com a heurística de busca local. E para garantir a não sobreposição dos setores, o algoritmo PSO provou sua alta eficácia e robustez na solução de problemas multi-objetivos. Os resultados mostraram que o método proposto foi eficaz na resolução do UA-FLP multi-objetivo.

Para o planejamento de leiautes pelo *Ant Colony Optimization*, tem-se estudos desenvolvidos por [27, 16, 38, 28, 6]. [27] investigaram o problema de projeto de caminho mais curto em leiautes de blocos que utilizam AGV's (*Automated Guided Vehicles*). Um modelo de programação linear foi desenvolvido para resolver esse problema. O modelo pretendia minimizar o comprimento do caminho do AGV por todas as células. Porém este modelo só é capaz de resolver problemas com um pequeno número de células. Então, utilizaram um algoritmo do sistema de colônia de formigas para resolução deste. Já [16] apresentaram um algoritmo de colônia de formigas para maximizar a produção de energia eólica, pela distribuição de oito turbinas, evitando o efeito *wake loss*; conseqüentemente, maximizando a geração de energia. Os autores sugeriram que as pesquisas com meta-heurísticas devem se concentrar em modelos mais realísticos de otimização. Enquanto que, [38] apresentam uma abordagem de otimização para resolver o problema de leiaute de instalações com setores de áreas desiguais e flexíveis (*Flexible Bay Systems* - FBS). Da mesma maneira, [28] desenvolveram um método para planejamento do leiaute de instalações, porém desta vez se tratava de uma empresa de manutenções de trens. Os autores apresentaram a ACO-GLS, uma abordagem híbrida de otimização pelas colônias de formigas associada a uma pesquisa local guiada. Os resultados obtidos pelos autores mostraram uma melhoria de cerca de 20% em relação ao leiaute atual do caso em análise. Por fim, [6] estenderam a aplicação do ACO para planejamento de leiautes dinâmicos que possuísem, ou não, restrições de orçamento. Esta pesquisa foi a primeira tentativa em demonstrar como o ACO pode ser aplicado ao DLP com restrições orçamentárias.

Quanto aos métodos heurísticos clássicos, [3, 4] planejaram o leiaute celular de manufatura com o reconhecimento simulado (*simulated annealing* - SA). No estudo desenvolvido por [3], o problema de leiaute de instalação (FLP) incluía o leiaute inter e intracelular. Um modelo contínuo de programação não-linear/contínua mista de dois níveis foi formulado para definir o problema e a relação entre *design* de leiaute intra e intercelular. As instalações assumidas eram de tamanho desigual. Sequências de operação, demanda de peças, eliminação de sobreposição e corredores foram consideradas no projeto. Deste modo, foi projetado e implementado uma meta-heurística de reconhecimento simulado que emprega uma nova heurística construtiva de

base radial para inicialização do algoritmo. Pela primeira vez, um novo algoritmo heurístico foi projetado para alocar e deslocar instalações em direção radial. Para validar o modelo, os autores utilizaram um estudo de caso real na indústria de corte de metal. Os resultados demonstraram a superioridade do algoritmo SA desenvolvido em relação às outras meta-heurísticas encontradas na literatura levantada por eles. Enquanto que na pesquisa desenvolvida por [4], os autores trataram de um problema de leiaute de instalações nos sistemas de fabricação. Através da natureza combinatória do problema, os autores propuseram uma abordagem híbrida, baseada no SA e na Pesquisa Tabu (*Tabu Search*). Os resultados computacionais mostraram que o procedimento utilizado por eles parece ser uma boa alternativa para tratar do planejamento de leiaute de instalações.

### 3. Método de pesquisa

De acordo com [41], para garantir a solidez e a relevância de uma pesquisa, tanto pelo campo acadêmico quanto pelo social, ela deve demonstrar que foi desenvolvida com o devido rigor que permita o debate e a verificação desta, garantindo assim a sua replicabilidade. Onde os métodos procuram apresentar um conjunto de etapas, aceitos pela comunidade acadêmica, com o objetivo de construir conhecimento acadêmico em um determinado campo de pesquisa, sendo esta uma crescente preocupação na engenharia de produção [49, 41]. Em decorrência de interesses práticos que visam a aplicação de ferramentas para a solução de problemas específicos, este trabalho classifica-se como pesquisa aplicada de abordagem quantitativa, embasado por processos de tomada de decisão e de modelagem [46]. Desta maneira, este projeto será conduzido sob o enfoque de uma pesquisa aplicada quantitativa, visto que visa gerar conhecimentos para a aplicação prática dirigido à solução de problemas específicos, tendo seus resultados validados mediante o estudo de caso. Este projeto também pode ser considerado como exploratório experimental, pois apresenta um modelo com dados reais de uma empresa a fim de apresentar um processo de tomada de decisão para o planejamento de arranjos industriais [61, 22].

A pesquisa operacional trata da aplicação de métodos científicos a problemas complexos com o intuito de auxiliar no processo de tomada de decisão, tal como, a alocação eficiente de recursos produtivos. Desenvolvendo métodos científicos para analisar sistemas complexos. Em geral, para a análise destes sistemas, a formulação de um modelo matemático se faz necessário, onde fatores de um problema real precisam ser considerados e a validação do modelo matemático deve ser coerente com o contexto original. Sendo assim, a PO e a programação matemática fazem o uso de modelos matemáticos que procuram representar/imitar um problema real [46].

Como este estudo se caracteriza por um processo de pesquisa por modelagem, ele pode ser enquadrado como modelagem computacional. Com os avanços em matemática e estatística aliados aos novos conceitos da ciência da computação, a manipulação das variáveis se faz possível, proporcionando a análise entre causa

e efeito de um determinado fenômeno [50]. A rigidez/garantia de um modelo (através da pesquisa por modelagem) se dá pela definição de pontos de controle para evitar a interferência de variáveis intervenientes, interferindo diretamente nos dados pela manipulação da variável independentes e observação do que ocorre com a variável dependente. Permitindo ao pesquisador avaliar se as conclusões inferidas mostram necessidade de revisão do modelo proposto, o que implica na repetição deste ciclo até à adequação do modelo matemático [58, 50].

Atualmente, as abordagens metodológicas em engenharia de produção e gestão de operações podem ser divididas em quatro categorias: (i) *survey*; (ii) modelagem e simulação; (iii) pesquisa-ação; e, (iv) estudo de caso [49]. Por mais que este estudo venha a fornecer um modelo para otimização do planejamento de leiautes, mas a sua validação ocorre pelo estudo de caso. Sendo assim, o estudo de caso serve para a solução de problemas reais que tratem da gestão de operações, sendo uma das muitas maneiras de se fazer pesquisa [71, 49]. Para a excelência de um estudo de caso, [71] define as cinco características básicas que este deve ser: (i) significativo; (ii) completo; (iii) considerar perspectivas alternativas; (iv) apresentar evidências suficientes ; e, (v) elaborado de uma maneira atraente. E para garantir a execução de um bom estudo de caso, [49] destaca que o ideal é realizar um planejamento estratégico deste, uma abordagem metodológica, dos diferentes níveis a serem estudados, assegurando a eficiência e o entendimento do caso.

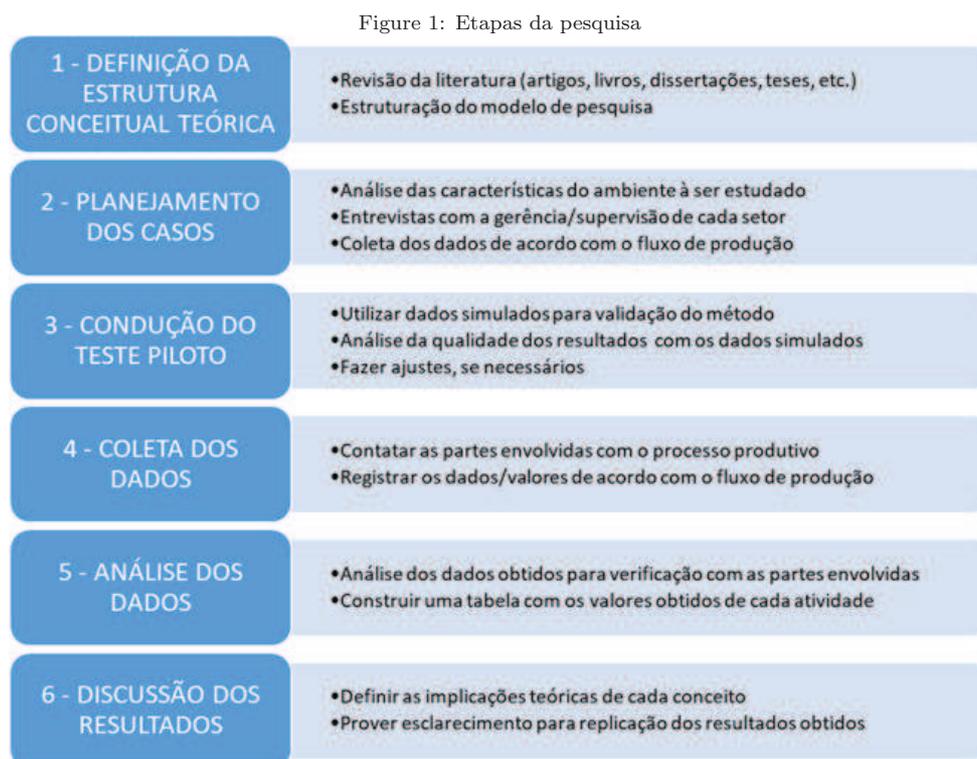
Uma vez definido o tema e o objetivo geral da pesquisa, tem-se como princípio a busca pelo referencial teórico como instrumento de suporte. Nesta etapa foram levantadas informações sobre os tipos de arranjo físico, métodos para planejamento de leiaute, ferramentas para tomada de decisão e heurísticas para a modelagem do problema. O levantamento do referencial teórico orientou-se pela busca de artigos que tratam-se sobre o problema de pesquisa, sendo estes encontrados nas seguintes bases de dados: *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *Emerald*, *EBSCO*, *Wiley*, *Taylor & Francis Group*, *SAGE Journals* e *Portal de Periódicos CAPES/MEC*, na identificação de artigos relacionados ao *gap* de pesquisa. As principais palavras-chave utilizadas foram: *Layout*, *Facility Layout Problem*, *Systematic Layout Planning*, *Analytic Hierarchy Process*, *Particle Swarm Optimization* e "*facility layout problem*" and "*metaheuristic*", incluindo traduções equivalentes em língua portuguesa, no período de 2013 a 2018 (exceto por alguns artigos que serviram como base para o *gap* de pesquisa).

### 3.1. Etapas da pesquisa

O desenvolvimento desta dissertação originou-se da união de dois artigos decorrentes do primeiro ano do mestrado acadêmico. O primeiro artigo tratava sobre o planejamento de leiautes industriais por ferramentas de planejamento e de tomada de decisão, onde o objetivo era avaliar o arranjo atual e propor melhorias para a nova fábrica que estava sendo construída pela empresa em questão. Já o segundo artigo visava a proposição de um modelo para o planejamento de leiautes através da otimização por algoritmos/meta-heurísticas, onde o intuito era aplicação no mesmo caso (permitindo a comparação com o SLP). Então, a união deste dois

artigos possibilitou a avaliação de qual método é mais eficiente no planejamento de leiautes industriais, onde existia uma lacuna de pesquisa sobre a comparação destes.

260 O método aqui proposto é dividido por seis etapas que apresentam como esta pesquisa se desenvolveu. A Figura 1 apresenta todas as estas etapas. Na sequencia é apresentado detalhadamente cada etapa, explicando o que se desenvolveu em cada uma. O intuito destas etapas é a replicação desta pesquisa.



Na etapa 1 é efetuada a revisão da literatura para conhecimento do método proposto e como este irá transcorrer. A revisão da literatura, principalmente a leitura de artigos, garante que este assunto foi revisado e permite confiabilidade aos leitores que pretendem replicar este estudo. Também, tem-se por meta encontrar lacunas de pesquisa que tornem este assunto relevante. O objetivo de se definir um método coerente com esta pesquisa, diz respeito à fácil compreensão do modelo proposto, ou seja, que o meio acadêmico e social, principalmente empresários, possam lê-lo e entendê-lo. A definição estrutura conceitual teórica é um dos principais meio, aos não leigos sobre este assunto, para entendimento da pesquisa que está sendo desenvolvida.

270 Já na etapa 2, deve-se analisar as características dos ambientes que vão ser estudados, ou seja, conhecer suas necessidades e especificações, entender o processo produtivo e verificar a característica de cada atividade. As entrevistas com a gerência ou supervisão, pessoas diretamente ligadas com aquele processo, permite o esclarecimento de dúvidas e a obtenção de dados para o planejamento do leiaute. A coleta de dados deve ser de acordo com o fluxo de produção, este pode ser obtido de um histórico fornecido pelo sistema informatizado,

275 ou pela previsão de demanda e simulação do fluxo entre setores. O objetivo de planejar previamente o caso, diz respeito ao conhecimento do leiaute global da empresa, para que assim seja possível a condução do teste piloto.

A etapa 3 representa a condução do teste piloto, onde variáveis são testadas de acordo com o planejamento do caso. São utilizados dados simulados para a validação do método. Onde tem-se como meta avaliar os resultados obtidos a partir dos dados simulados, para que não haja inconsistência nas respostas que serão 280 obtidas com os dados reais. Se necessário, deve-se proceder com ajustes para que a ferramenta forneça o melhor resultado possível. Uma simulação prévia permite a validação do objetivo da pesquisa, e é ela que permite dar o início à coleta de dados reais do processo produtivo.

Na etapa 4 são coletados os dados de acordo com cada processo produtivo. São contatadas as partes 285 envolvidas com este processo, pois são elas que esclarecerão as dúvidas e fornecerão os valores necessários para o planejamento de leiaute. Esses dados devem ser registrados de acordo com a característica de cada setor e o fluxo de material que percorre entre eles. Após coleta, estes dados são simulados e analisados.

A etapa 5, análise dos dados, diz respeito à verificação dos resultados obtidos com a coleta de dados. Para verificação destes, é de suma importância a participação das partes envolvidas, pois são elas que auxiliaram 290 na verificação destes. Por se tratar de ferramentas de interpretação e algoritmos, estes resultados podem não ser os "melhores" para empresa, sendo necessário uma nova simulação. A construção de uma tabela com os valores obtidos nas entrevistas, serve de *backup* para novos testes. Estes resultados devem ser discutidos, etapa 6, verificando se estão de acordo com a teoria e quais suas implicações. Por fim, deve-se esclarecer os resultados obtidos para futuras replicações/re-simulações.

295 Para tornar mais evidente as etapas citadas anteriormente, elaborou-se um fluxograma do processo de planejamento de leiaute, Figura 2. O fluxograma desenvolvido para esta pesquisa fornece os passos que devem ser seguidos para obter sucesso no planejamento de leiaute. Este fluxograma permite a replicar o método aqui desenvolvido.

Seguindo as etapas de Fluxograma 2, inicialmente é necessário coletar os dados para o planejamento do 300 leiaute industrial, sendo eles, fluxo de material, tamanho dos setores, portões de entrada e saída e a distância entre setores (corredores). Após coleta dos dados, deve-se decidir qual método empregar (SLP ou meta-heurístico), neste caso os dois serão empregados para comparação dos resultados. A seleção do método de planejamento de leiaute é uma consequência do número de setores e da complexidade das variáveis.

Se selecionar o método SLP, deve-se elaborar a diagrama de relacionamento e dispor os setores de acordo 305 com a importância de proximidade, este processo ocorrerá pela distribuição adimensional de blocos (para tornar mais realística esta etapa, sugere-se o uso de blocos com os tamanhos aproximados de cada setor). Após serão definidos os critérios para a tomada de decisão da melhor proposta de leiaute definida no método SLP. Os valores mensurados serão transmitidos em relação ao seu grau de importância, pela comparação por pares. Os valores definidos na etapa anterior serão utilizados para comparar qual a melhor proposta planejada

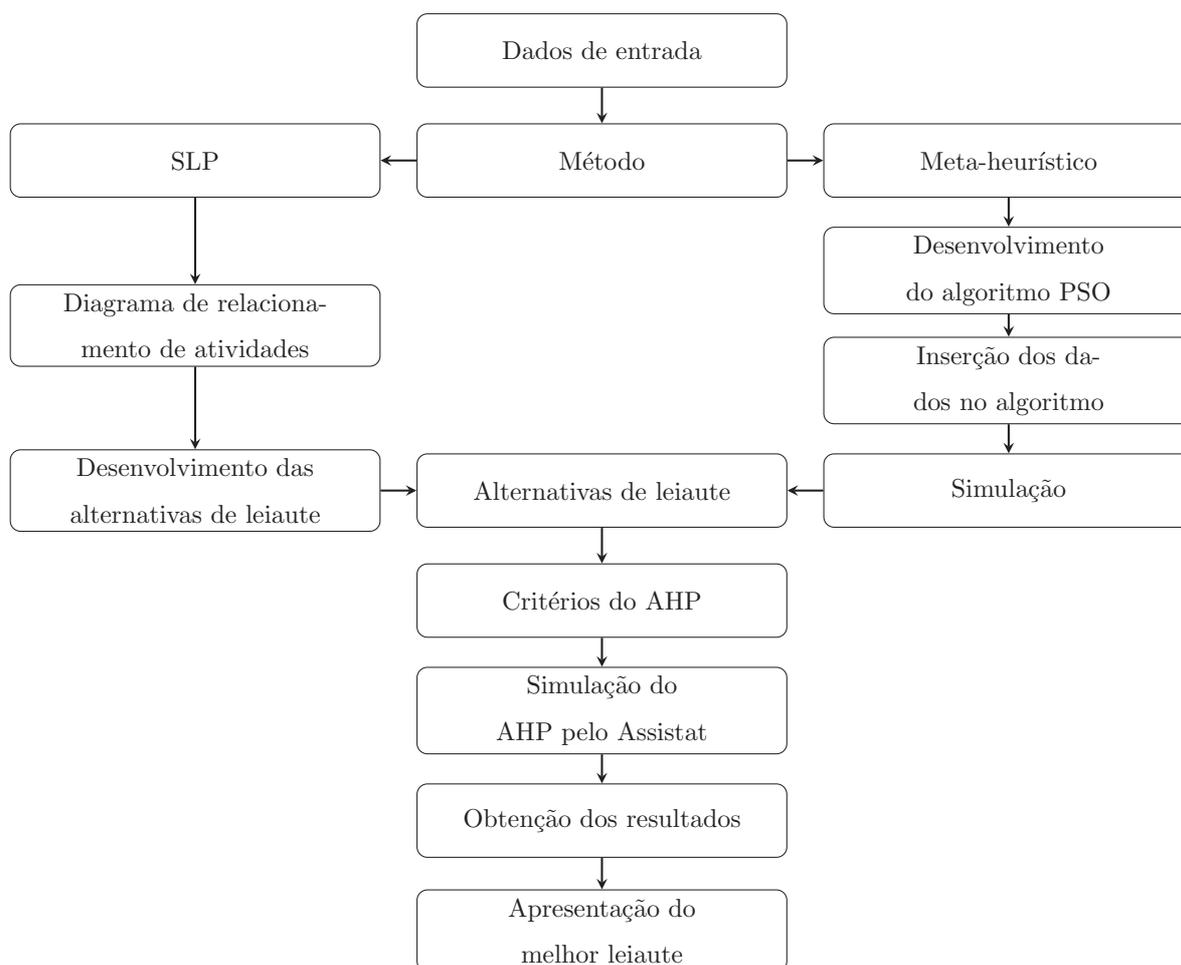


Figure 2: Processo de planejamento do leiaute

Fonte: Elaborado pelo autor

310 com o *software* Assistat. Por fim, será selecionado o leiaute que atenderá as necessidades da empresa. Este resultado será apresentado para a empresa em análise.

315 Senão, será utilizado o método meta-heurístico, o algoritmo *Particle Swarm Optimization*. Os dados coletados serão inseridos no algoritmo, e serão definidos os critérios do método meta-heurístico. Os dados serão simulados, gerando a "melhor" proposta de leiaute, ou seja, aquela que melhor atenda as necessidades da empresa; visando a redução de custos. Se o resultado não for aceitável, este deverá ser reavaliado através da verificação dos parâmetros do algoritmo, e efetuada uma nova simulação dos dados. Após, com uma proposta de leiaute aceitável, esta deverá ser apresentada para a empresa em análise.

### 3.2. Ferramentas computacionais

Para a análise dos dados levantados na etapa decisória será utilizado um *software* de assistência estatística, o Assistat. O *software* desenvolvido pelo professor Dr. Francisco de A. S. e Silva da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Brasil, tem como intuito analisar os dados do método AHP. O Assistat é um *software* utilizado para análise de variância, tendo sua difusão ampliada nos últimos anos por alunos de Graduação, Pós Graduação, Mestrado e Doutorado. O *software* normaliza a matriz AHP e simula os valores de acordo com as fórmulas deste método. Segundo o *software*, os valores de RI são tabelados de acordo com a escala de Saaty (1980) e Ramos (2000), e uma reavaliação da matriz de comparação poderá ser necessária caso o valor de CR seja maior que 0,1. Também, se for do interesse do projetista, o mesmo pode imprimir os resultados fornecidos pelo Assistat. [62].

Já para o desenvolvimento do algoritmo PSO, será utilizado o programa MATLAB. Este é um poderoso sistema de computação e é aplicado para lidar com cálculos científicos de engenharia, permitindo uma linguagem de alto nível e um ambiente interativo [31, 25]. O nome MATLAB significa "Matrix Laboratory", pois foi projetado para tornar fácil a computação de matrizes [25]. Usando o MATLAB, você pode analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos e aplicativos [31]. Para muitos problemas técnicos, você insere apenas um ou dois comandos e o MATLAB faz a maior parte do trabalho para você [25]. O idioma, as ferramentas e as funções matemáticas incorporadas no MATLAB, permitem que você explore várias abordagens e alcance uma solução mais rápida do que com planilhas ou linguagens tradicionais de programação, como C/C++ ou Java [31, 25]. Uma das principais vantagens do MATLAB, em relação às linguagens de tradicionais de programação, é que você pode usá-lo de forma interativa [25].

## 4. Apresentação e discussão dos resultados

A empresa em análise está situada atualmente na região central do Rio Grande do Sul, em uma área de aproximadamente três mil metros quadrados. Onde já passou por várias reformulações desde a sua criação. O seu leiaute foi replanejado inúmeras vezes, conforme o crescimento da empresa. Os setores que hoje a compõem, foram planejados pela experiência fabril de funcionários que estavam diretamente ligados com o processo produtivo. O procedimento de planejamento levava em consideração os espaços disponíveis para a inserção de novas máquinas. A planta era planejada sem o auxílio de ferramentas gerenciais. Desta maneira, utilizando apenas a experiência e o conhecimento do processo. O que acarretou em diversas unidades que separam o prédio em partes. Por consequência, estas ampliações impactaram na descentralização de alguns setores.

Como a empresa em análise se encontra em um espaço limitado, dificultando o crescimento e o planejamento do leiaute do processo produtivo. Teve-se como premissa a aquisição de um novo terreno e a construção de uma nova fábrica, fora da área central do município em que se encontra atualmente. Permitindo elevar a

capacidade de produção, a redução de custos por movimentação de materiais, a aquisição de novos equipamentos e o replanejamento do leiaute.

O planejamento deste leiaute considerou as necessidades internas da empresa. A primeira dizia respeito à aquisição de novas máquinas, pois o espaço físico atual não comporta uma nova capacidade produtiva. A segunda, considera também que este novo espaço permita a adoção de normas como, Boas Práticas de Fabricação (BPF), ISO 22000 e TS 22000, requisitos de qualidade em produção de embalagens. Outra, que teve forte impacto no projeto de leiaute, foi a necessidade de ganho de área. E a última necessidade da empresa, levava em consideração a possibilidade de incremento de produtos.

As dimensões dos setores e o espaçamento entre eles, foram definidos de acordo com o tamanho dos equipamentos que se encontram na fábrica atual da empresa, prevendo espaços mais amplos para a movimentação de materiais e pessoas. Inclusive, foram considerados espaços para reserva técnica no caso de aquisição de novos equipamentos. Projetando que estes ocupem espaços maiores que os atuais, visto que o mercado está partindo para máquinas mais robustas e com alta capacidade produtiva. Os setores de transformação, extrusão, impressão, laminação e rebobinagem, foram planejados com dobro do tamanho necessário, considerando-se duplicar a produção atual. Comparando o leiaute antigo com a visão para a nova proposta, têm-se como premissa manter os setores existentes, porém, readequar a distribuição destes de acordo com cada etapa do processo produtivo. Desta maneira, cada setor terá seu espaço bem caracterizado, separado por barreiras físicas que evitam a contaminação de materiais. Sendo assim, a empresa permanece com os mesmos setores, porém redistribuídos para atender novas normas de fabricação, o que permite a entrada em novos mercados.

## 5. Coleta de dados

Como esta pesquisa se trata de um estudo de caso, procedeu-se com uma visita inicial para conhecimento do processo produtivo, das características da empresa, do fluxo de produção e entrevista com as partes envolvidas. A partir desta preliminar, foi possível determinar o tipo de leiaute a ser definido e de que forma este modelo irá auxiliar no planejamento ou replanejamento do mesmo. A empresa em análise é do ramo gráfico, ou seja, produz embalagens flexíveis para alimentos, rações, materiais elétricos, entre outros produtos que utilizem embalagem plástica para armazenagem de produtos.

No levantamento dos dados, foram identificados dez setores que fazem parte do processo produtivo para a produção de embalagens, sendo eles: extrusão (EXT), almoxarifado (ALM), impressão (IMP), revisão (REV), laminação (LAM), metalização (MET), parafinagem (PAR), rebobinagem (REB), corte e solda (CeS) e expedição (EXP). No planejamento destes setores, foi considerado a alocação dos mesmos em uma nova planta industrial, ou seja, não há restrições em relação à área total. Pois a empresa está em processo de planejamento de uma nova unidade. E ao obter o conhecimento de cada etapa do processo produtivo, partiu-se para a definição das características/peculiaridades de cada atividade. Tal como, a definição do

fluxo de produção (quantidade de material enviado de um setor para outro), dados disponíveis no sistema informatizado da empresa em questão, Tabela 3.

Table 3: Fluxo de materiais

	EXT	ALM	IMP	REV	LAM	MET	PAR	REB	CeS	EXP
EXT	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
ALM	0%	0%	30%	0%	30%	5%	10%	5%	5%	15%
IMP	0%	0%	0%	64%	0%	0%	8%	28%	0%	0%
REV	0%	0%	0%	0%	56%	44%	0%	0%	0%	0%
LAM	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	97%	0%	0%
MET	0%	0%	0%	0%	38%	0%	0%	35%	27%	0%
PAR	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
REB	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	34%	66%
CeS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
EXP	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

O setor de extrusão da empresa em análise produz bobinas de polietileno (PE) e polipropileno (PP), que são enviadas ao setor de almoxarifado. Em 100% dos casos, conforme apresentado pelo gerente de produção, o material que sai da extrusão vai direto para o almoxarifado. Já o setor de almoxarifado, envia as bobinas de PE, PP, polipropileno bi-orientado (BOPP), poliéster ou polietileno tereftalato (PET), papel e alumínio aos setores de impressão e laminação, e em alguns casos, para parafinagem, metalização, rebobinagem e corte e solda, sendo estas ocorrências não muito frequentes; inclusive, tem-se como objetivo compartilhar os funcionários com o setor de expedição. Este dado foi apresentado pelo Líder de Almoxarifado e o Gerente de Suprimentos. Para os demais setores, impressão, parafinagem, revisão, metalização, laminação, rebobinagem e corte e solda, os dados foram coletados do sistema informatizado da empresa, e filtrados para fornecer a porcentagem do material que é produzido e enviado para a atividade seguinte. Os dados foram exportados do sistema conforme os valores fornecidos pelos apontamentos de produção. O levantamento da porcentagem veio da relação de quanto do total produzido foi enviado para a etapa seguinte, desta maneira cada setor teve uma porcentagem de recebimento de material produzido na etapa anterior.

Tratando das características do processo produtivo, a altura do prédio onde ficará alocado o setor de extrusão deve ser considerada; pois, por este possuir uma máquina com torre de extrusão de altura elevada (quinze metros), é necessário deixá-lo alocado em uma das extremidades da planta, devido a altura ser superior aos demais setores. Quanto ao setor de impressão, este deve estar separado do processo produtivo, ou seja, não pode ter contato direto por apresentar risco de explosão; desta maneira, foi definido que o setor de impressão deve respeitar uma distância mínima de dez metros em relação aos demais. Por fim, deve-se

405 considerar os pontos de entrada (*input*) e saída (*output*) dos materiais; os valores representados vão de zero a um, onde zero é o vértice inicial, e um representa uma volta completa no setor. Portanto, para garantir que estes critérios sejam atendidos, a formulação da proposta no *Systematic Layout Planning* e do modelo no algoritmo devem levar em consideração estes detalhes. Sendo assim, estas características levantadas encontram-se na Tabela 4.

Table 4: Dimensões dos setores

Setor	Largura (m)	Altura (m)	Distância (m)	Input	Output
Extrusão	37	32	02	0.50	0.50
Almoxarifado	22	37	02	0.00	0.75
Impressão	31	54	10	0.62	0.62
Revisão	09	08	02	0.87	0.37
Laminação	15	17	02	0.00	0.00
Metalização	15	15	02	0.25	0.20
Parafinadora	11	14	02	0.00	0.00
Rebobinagem	11	33	02	0.00	0.75
Corte e Solda	16	33	02	0.75	0.00
Expedição	15	33	02	0.12	0.60

## 410 5.1. Planejamento das propostas de leiaute

### 5.1.1. Systematic Layout Planning

Em um projeto de leiaute pelo *Systematic Layout Planning* (SLP), deve-se considerar dois diagramas para a elaboração da planta, o de relação de atividades e o de blocos. O diagrama de relação de atividades teve como princípio definir o grau de importância entre os setores, definindo assim as proximidades entre eles. Já 415 o diagrama de blocos, é a representação do projeto de leiaute. Desta maneira, estes dois processos dão o início para o planejamento da planta fabril, permitindo entender o processo e elaborar as possíveis propostas de leiaute.

O diagrama de relação de atividades tem como função apresentar o nível de importância ou proximidade de um setor em relação ao outro. O diagrama é elaborado conforme dados levantados da produção, ou de 420 definições em conjunto com os gerentes e supervisores que estão diretamente ligados aos setores analisados. A definição da importância fica transcrita no cruzamento da reta entre os setores. A porcentagem dos critérios definidos na serve como guia de elaboração do diagrama de relação de atividades. Estes valores foram definidos em conjunto com os gestores de produção da empresa em análise. Desta maneira, pode-se definir a importância quando se compara setor com setor, utilizando os dados dados de fluxo de material.

425 Com os dados do processo produtivo, calculados e analisados, pode-se definir o diagrama de relação de atividades. No diagrama deve-se indicar com um código alfabético, qual a importância da proximidade de um setor com outro. Este código deve ficar inscrito no cruzamento de dois setores, o código para preenchimento do gráfico deriva da Tabela 3. Este processo é repetido para os demais setores, até que todo diagrama esteja preenchido e se possa realizar a próxima etapa, que é um quadro síntese do diagrama de relação de atividades.

430 Este quadro (Quadro 5), teve como objetivo facilitar o entendimento do diagrama de relação de atividades. O seu desenvolvimento, permite a estruturação do diagrama de blocos. Desta maneira, é possível planejar o projeto de leiaute da empresa conforme as suas características.

Table 5: Quadro de relação de atividades

Atividades	A	E	I	O	U	X
1. Extrusão	2					3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10
2. Almojarifado	1; 10	3; 5		7	6; 8; 9	4
3. Impressão	4	2	8		7	1; 5; 6; 9; 10
4. Revisão	3; 5; 6					1; 2; 7; 8; 9; 10
5. Laminação	4; 8	2; 6				1; 3; 7; 9; 10
6. Metalização	4	5; 8	9		2	1; 3; 7; 10
7. Parafnadeira	8			2	3	1; 4; 5; 6; 9; 10
8. Rebobinagem	5; 7; 10	6; 9	3		2	1; 4
9. Corte e Solda	10	8	6		2	1; 3; 4; 5; 7
10. Expedição	2; 8; 9					1; 3; 4; 5; 6; 7

O diagrama de blocos é um processo que serve de auxílio ao planejamento do leiaute. Ele está relacionado com o fluxo de materiais e os dados levantados no diagrama de relação de atividades. Esta etapa inicia com a montagem de uma tabela com os dados do diagrama de relação de atividades, após, estes são transcritos

435 em um quadro que sintetiza-o. Concluída a etapa anterior, pode-se iniciar as simulações das propostas de leiaute conforme os critérios de proximidade para montagem da planta fabril. O quadro deve ser composto pelas atividades levantadas e os códigos de proximidades. Em cada linha deve-se preencher, na respectiva coluna, com o número que corresponde com a proximidade que foi definida na comparação entre os setores.

440 Ao finalizar o Quadro 5, procede-se com a transcrição dos valores para os blocos que representam os setores do processo produtivo.

Para a empresa em análise, foram elaborados dez blocos, colocando o nome e número de cada um no centro do quadro. Os valores de proximidade foram distribuídos nos cantos e no centro, de acordo com o nível de importância. Os quadros representaram o tamanho aproximado que deve ter cada setor. Desta maneira, nos cantos superiores, esquerdo, ficaram dispostas as atividades com o código “A”, e direito, as tarefas com o

445

código de importância “E”. Nos cantos inferiores estão distribuídas as relações de código “T” e “O”, ficando do lado esquerdo e direito, respectivamente. As atividades de código “U” ficam de fora dos quadros, estas são omitidas. E no centro ficam as relações “X”, abaixo do número ou nome da atividade. Uma vez que as dez atividades estejam listadas, deve-se distribuir as etapas que compõem o processo da empresa de maneira que satisfaça o projeto de leiaute. Avaliando todas as possibilidades que sejam necessárias no planejamento.

Deve-se iniciar com a atividade considerada a mais importante, que inicia o fluxo de produção, e prosseguir com as demais até que todos os setores estejam distribuídos no conforme critérios do SLP. Após distribuição dos setores, foram definidos cinco projetos de leiaute. Estes projetos originaram-se da união dos blocos, respeitando os critérios definidos pela teoria estudada. Os leiautes L1\_SLP, L2\_SLP, L3\_SLP, L4\_SLP e L5\_SLP representam as propostas projetadas pelo SLP. Destacando que o L5\_SLP foi planejado pela empresa em questão.

### 5.1.2. Particle Swarm Optimization

Após análise do referencial teórico sobre métodos heurísticos e meta-heurísticos para o planejamento de leiaute, considerou-se a aplicação do *Particle Swarm Optimization* (PSO) devido ao seu alinhamento com o problema e as lacunas de pesquisas existentes. Desta maneira, procedeu-se com a pesquisa em bases de dados, com códigos Matlab, que utilizassem este método para o planejamento de leiautes. Na base de dados [70], foi identificado um algoritmo PSO que se enquadrava no problema de pesquisa e que possuía similaridade com o estudo em questão. Porém foi necessário adaptar o modelo do mesmo, alterando as variáveis para o caso em questão, de acordo com as características identificadas durante as visitas na empresa. Sendo assim, a função responsável pela definição do modelo foi reescrita, mas a estrutura principal foi mantida.

Com os dados da empresa coletados, partiu-se para a estruturação do algoritmo base do PSO, Algoritmo 1. O algoritmo base apresenta a operacionalização do PSO para o planejamento de leiautes. Onde, inicialmente, define-se o modelo de acordo com as características da empresa. No modelo, são inseridos dados referente ao processo produtivo. Ou seja, fluxo de produção, porcentagem de material enviado de um setor para o outro (prioridades de aproximação), largura e altura das áreas produtivas, espaçamento entre departamentos (corredores), portões de entrada e saída e número de variáveis (representado pelos setores). Estas atividades representam o estudo de caso. Na sequência são estabelecidos os parâmetros da população. Sendo a definição do critério de parada e o número de população utilizado na simulação. Ao definir os parâmetros, deu-se início à simulação pelo PSO. Onde o algoritmo PSO, pela busca local, efetua um melhoramento na proposta, aproximando os setores o máximo possível (respeitando os critérios definidos no início do modelo).

Para converter os dados coletados, Tabela 4, ao algoritmo PSO, iniciou-se pela modelagem das dimensões da empresa em questão (estrutura que pode ser replicada para outras empresas de pequeno e médio porte). Desta maneira, em uma matriz, foram atribuídos os valores referentes aos tamanhos dos setores produtivos, largura e altura. Inclusive, com os dados de altura, o algoritmo interpretava o número de variáveis inseridas

480 e calculava o quantidade de setores da empresa. Na sequência, definiu-se o espaçamento de dois metros entre os setores, exceto pela impressão que necessitava de uma distância de dez metros devido ao risco de explosão por gases inflamáveis. Quanto aos portões de entrada e saídas, estes foram distribuídos conforme o processo produtivo atual, onde 0.00 representava um canto do setor e 1.00 correspondia a uma volta completa no mesmo. Por fim, definiu-se a área total da fábrica, o espaço no qual os setores deveriam ser alocados pelo  
485 algoritmo PSO.

Definidos os tamanhos dos setores, o espaçamento dos corredores, os portões de entrada e saída e a área disponível para alocação das áreas produtivas, procedeu-se com o planejamento do fluxo produtivo. Inicialmente analisaram-se as características do processo produtivo da empresa, onde estas foram levantadas

```

1 Create model;
2 Set stopping criterion;
3 Set population size;
4 Set parameters;
5 Initialization;
6 while (stop criterion is not reached) do
7   for (each population) do
8     | Construct the solutions;
9   end
10  for (it=1:MaxIt) do
11    | {PSO Main Loop}
12    | Motion on xhat;
13    | Motion on yhat;
14    | Motion on rhat;
15  end
16  NewParticle = GlobalBest; {Apply Local Search}
17  NewParticle.Position = ImproveSolution(GlobalBest.Position, model, Vars); {Improve Global
    | Best}
18  if (NewParticle.Cost < GlobalBest.Cost) then
19    | GlobalBest = NewParticle;
20  end
21  BestCost(it) = GlobalBest.Cost; Plot Solution; Store Best Cost;
22 end

```

**Algoritmo 1:** Pseudocódigo Algoritmo PSO

490 pelo fluxo de materiais, Tabela 3; ou seja, a quantidade de material enviado de uma setor para o outro. Estes dados foram transcritos como matriz para a função modelo do Matlab. A porcentagem de material enviado representava as prioridades de aproximação entre setores de acordo com o fluxo de produção. Em resumo, o fluxo de produção foi definido de acordo com a quantidade de material (kg) enviado de um setor para outro.

495 Com a função modelo estruturada, deu-se início a definição dos, critério de parada, tamanho da população e parâmetros do PSO. Após definir os critérios, é possível iniciar a simulação pelo PSO. Onde, as partículas são inicializadas em posições escolhidas aleatoriamente e movimentadas dentro do espaço disponível. E a cada iteração do algoritmo, a qualidade da posição de cada partícula é julgada e atualizada para uma melhor posição, se houver. Com estas definições o algoritmo gera a melhor proposta de leiaute. Por fim, o algoritmo plota a solução e apresenta a redução do custo ao longo da simulação (valor fornecido pelo Matlab).

500 Após estruturado o algoritmo PSO, deu-se início à fase de testes e validação do mesmo. O objetivo destas simulações visava verificar a qualidade das alternativas geradas pelo algoritmo. Constatando que estas estavam conformes, procedeu-se com as simulações para o fornecimento das propostas de leiautes. Destas simulações, cinco propostas de leiautes foram consideradas aceitáveis; conforme a "Flag" *Feasible*, fornecida pelo algoritmo, e avaliação do alinhamento com as expectativas da empresa em questão. Os leiautes L1\_PSO, L2\_PSO, L3\_PSO, L4\_PSO e L5\_PSO representam as propostas planejadas pelo PSO.

## 505 5.2. Seleção do leiaute pelo Analytic Hierarchy Process

Como esta pesquisa teve por objetivo utilizar dois métodos no planejamento de leiautes, *Systematic Layout Planning* e *Particle Swarm Optimization*, decidiu-se aplicar uma ferramenta de tomada de decisão multicritério para selecionar a melhor preposta. De acordo com a literatura, o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) apresentava as melhores características para o ranqueamento das melhores propostas de leiautes. E por se tratar de um método para planejamento de leiautes de pequenas e médias empresas, onde os valores eram oriundos de um estudo de caso único, optou-se por realizar duas simulações. A primeira simulação dizia respeito ao estudo de caso, considerando-se os atributos/critérios da empresa. E a segunda simulação, utilizou os objetivos encontrados na literatura sobre *Facility Layout Planning* (FLP) simulados por meta-heurísticas nos últimos cinco anos; com o objetivo de generalizar o modelo. Em resumo, com esta análise de dados, 515 fez-se possível apresentar um método aplicável em diferentes empresas de pequeno e médio porte.

A primeira simulação do AHP foi relacionada com os atributos/critérios da empresa em estudo, ou seja, do estudo de caso. As prioridades foram definidas em grupos focais, conforme as expectativas dos gestores envolvidos diretamente com o processo de planejamento e as atividades produtivas. Sendo assim, foram definidos quatro critérios para as comparações por pares do método AHP: (i) atendimento às normas de 520 Segurança, Saúde e Meio Ambiente (SSMA) e Boas Práticas de Fabricação (BPF); (ii) minimizar o manuseio de materiais; (iii) minimizar a distância entre setores; e, (iv) redução da área fabril. Por fim, compararam-se as propostas de leiautes.

Quanto ao atendimento às normas de SSMA e BPF, procurou-se analisar as propostas que apresentassem o menor número de *bypassing* e *backtracking*, ou seja, uma proposta que possuísse um fluxo de produção sem sobreposições. Para minimizar o manuseio de materiais, somaram-se as principais rotas percorridas pelos materiais dentro do processo produtivo; a distância foi medida entre os centroides dos setores, visto que é possível remanejar os portões de entrada e saída. Já a distância entre setores, envolveu o somatório de todos trajetos possíveis de acordo com as porcentagens do fluxo de produção; a distância também foi medida pelos centroides das áreas produtivas. Por fim, a redução da área fabril analisou as medidas da relação de largura pela altura. Como tratava-se de um problema de minimização, as menores distâncias e medidas foram consideradas as melhores. Somente para o critério de atendimento às normas SSMA e BPF, efetuaram-se análises qualitativas.

Table 6: Escala de importância (Saaty) referente ao estudo de caso

Abreviatura	Critério	Peso
Crit. 1	Atendimento às normas de SSMA e BPF (Fluxo)	9
Crit. 2	Minimizar o manuseio de materiais	7
Crit. 3	Minimizar a distância entre setores	3
Crit. 4	Redução da área fabril	1

Desta maneira, elaborou-se a Tabela 6 que apresenta o peso de cada critério, conforme definição em conjunto com os gestores da empresa em questão. A atribuição destes valores respeitou a escala fundamental de Saaty, método empregado em outras análises AHP. Na sequência estruturou-se uma tabela para comparações por pares entre os atributos/critérios, os valores da mesma foram atribuídos respeitando os dados obtidos na Tabela 6. Após as comparações por pares entre os atributos/critérios da empresa, deu-se início à análise das propostas de leiautes, as comparações por pares entre as propostas de leiautes foram efetuadas para cada atributo/critério. Por fim, com os valores calculados, elaborou-se a Tabela 7 para ordenação das melhores propostas de leiaute.

Com estes valores, constatou-se que as propostas de leiautes fornecidas pelo SLP atendiam melhor as necessidades da empresa em estudo, em relação ao PSO. Sendo assim, as cinco melhores leiautes eram: L.4.SLP, L.1.SLP, L.2.SLP, L.3.SLP e L.5.SLP, respectivamente. Ressaltando que a proposta de leiaute número 5 (SLP) é referente à planejada pela empresa. Desta maneira, percebe-se que o Leiaute L.5\_PSO, aproximou-se da proposta da empresa, podendo ser considerado como resultado satisfatório. As demais propostas de leiaute fornecidas pelo PSO não apresentaram resultado satisfatório para este caso.

A segunda simulação pelo método AHP utilizou os objetivos para o *Facility Layout Problem* (FLP) encontrados na literatura. Estes objetivos buscavam minimizar: (i) a distância entre máquinas/setores; (ii) o custo de manuseio de materiais; (iii) o custo de rearranjo; (iv) o custo do espaço; e, (v) o fluxo de material.

Table 7: Ordenação das melhores propostas de leiaute - Empresa

	Crit. 1	Crit. 2	Crit. 3	Crit. 4	Classif.
L.1_SLP	0,3931	0,2831	0,2727	0,5704	0,3581
L.2_SLP	0,1523	0,4035	0,3951	0,1937	0,2492
L.3_SLP	0,2118	0,2831	0,2727	0,4071	0,2468
L.4_SLP	0,5398	0,5657	0,5583	0,2850	0,5377
L.5_SLP	0,2897	0,0497	0,1334	0,0326	0,1942
L.1_PSO	0,0357	0,0737	0,0639	0,0569	0,0502
L.2_PSO	0,0357	0,0352	0,0453	0,1243	0,0403
L.3_PSO	0,0756	0,1063	0,0916	0,1243	0,0882
L.4_PSO	0,0521	0,0497	0,0335	0,0814	0,0510
L.5_PSO	0,1081	0,1499	0,1334	0,1243	0,1233
Pond.	0,5739	0,2913	0,0903	0,0445	-

550 Estes objetivos foram priorizados de acordo com o número de aplicações nas literaturas dos últimos cinco anos para meta-heurísticas, respeitando os valores da escala de Saaty.

Para minimizar a distância entre máquinas/setores, calculou-se a distância entre os centroides das áreas produtivas, de acordo com a porcentagem de material enviado entre eles. Ou seja, foram consideradas todas as atividades que enviam material entre si. E a minimização do custo de manuseio de materiais, fez-se similar a anterior, porém neste objetivo foram consideradas as principais atividades do processo produtivo. Quanto ao custo de rearranjo, analisou-se em conjunto com os gestores as propostas de leiautes que melhor atendiam as expectativas da empresa, os valores foram atribuídos conforme a escala de Saaty. Já, para a minimização do espaço, calcularam-se as áreas das propostas de leiautes pela relação da largura com a altura do setor. Por fim, o fluxo de material foi avaliado conforme o *bypassing* e o *backtracking*, ou seja, não deveria haver 560 sobreposições de atividades.

Table 8: Escala de importância (Saaty) referente aos objetivos da literatura para FLP

Abreviatura	Critério	Peso
Crit. 1	Minimizar a distância entre setores	6
Crit. 2	Minimizar o custo de manuseio de materiais	9
Crit. 3	Minimizar o custo de rearranjo	5
Crit. 4	Minimizar o custo do espaço	3
Crit. 5	Minimizar o fluxo de material	1

Desta maneira, elaborou-se a Tabela 8 para atribuir o peso de cada critério, conforme escala de Saaty.

Estes valores respeitaram o número de aplicações dos objetivos constatados nas literaturas dos últimos cinco anos para meta-heurísticas referente ao FLP, a tabela representou a comparação por pares. Esta comparação foi efetuada conforme os pesos atribuídos na Tabela 8. Na sequência, as propostas de leiautes foram comparadas em pares de acordo com cada objetivo/critério. Os valores destas representaram os objetivos de minimização encontrados na literatura. Desta maneira, foram considerados os menores valores como os de maior importância. E para a análise do fluxo e rearranjo, analisou-se qualitativamente em conjunto com os gestores da empresa em estudo. Por fim, a Tabela 9 apresentou a ordenação das melhores propostas de leiautes.

Table 9: Ordenação das melhores propostas de leiaute - Literatura

	Crit. 1	Crit. 2	Crit. 3	Crit. 4	Crit. 5	Classif.
L.1.SLP	0,3568	0,2831	0,2476	0,5704	0,4205	0,3987
L.2.SLP	0,5071	0,4035	0,1725	0,1937	0,1569	0,4604
L.3.SLP	0,3568	0,2831	0,4942	0,4071	0,2187	0,4197
L.4.SLP	0,6984	0,5657	0,4942	0,2850	0,5810	0,7052
L.5.SLP	0,1614	0,0497	0,2476	0,0326	0,3034	0,1375
L.1.PSO	0,0733	0,0737	0,0433	0,0569	0,0376	0,0834
L.2.PSO	0,0523	0,0352	0,0322	0,1243	0,0376	0,0560
L.3.PSO	0,1056	0,1063	0,0859	0,1243	0,0784	0,1294
L.4.PSO	0,0391	0,0497	0,0606	0,0814	0,0544	0,0643
L.5.PSO	0,1614	0,1499	0,1218	0,1243	0,1115	0,1814
Ponder.	0,2652	0,6701	0,1808	0,0888	0,0451	-

Os dados da Tabela 9 mostram que o leiaute 4, planejado pelo SLP, é novamente a melhor proposta. Seguido pelos leiautes 2, 3 e 1, planejados pelo SLP, e 5, simulado pelo PSO. Tem-se aqui a primeira aparição de uma proposta de leiaute fornecida pelo PSO entre as 5 melhores. Nesta rodada, a proposta planejada pela empresa está de fora das cinco melhores. Nas duas simulações do AHP, pode-se constatar que as propostas de leiautes planejadas no SLP são mais satisfatórias; porém não descartam-se os resultados obtidos no PSO.

## 6. Considerações finais

O planejamento de leiautes envolve a alocação de instalações dentro de uma área fabril. Mas não só alocação de setores, como também a distribuição de máquinas e pessoas, identificação de portões de entrada e saída, definição do fluxo de materiais e informações, redução de estoques em processo e uso adequado do espaço existente. Para tanto, esta pesquisa identificou objetivos/critérios, na literatura, que pudessem ser

580 aplicados em empresas de pequeno e médio porte. Apresentando dois métodos, distintos, para o planejamento de leiautes. Desta maneira, dividiu-se em três etapas.

A primeira parte desta pesquisa envolveu o levantamento teórico sobre métodos para planejamento de leiautes. O primeiro objetivo específico tratava da identificação de estratégias utilizadas em trabalhos aplicados da literatura para o planejamento de leiaute. Esta identificação considerava encontrar ferramentas de menor complexidade, ou seja, de fácil aplicação pelos gestores das pequenas e médias empresas e outras mais robustas, porém de maior complexidade.

A segunda etapa tinha como objetivo a escolha, entre os modelos identificados na literatura, aqueles que apresentassem melhores condições de atuar em empresas de pequeno e médio porte. A escolha se baseava na definição de dois modelos para o planejamento de leiautes. O primeiro método selecionado foi o *Systematic Layout Planning* (SLP), ferramenta bem difundida na literatura e de fácil aplicação em diferentes tipos de empresas. O segundo método selecionado foi o *Particle Swarm Optimization* (PSO), meta-heurística sugerida em pesquisas publicadas recentemente em periódicos qualificados. Por fim, para decisão da melhor proposta de leiaute fornecida pelos dois métodos, seguiu-se para a próxima etapa, avaliação e seleção de uma ferramenta de tomada de decisão.

595 A terceira etapa, e última, avaliou os resultados da aplicação das ferramentas por meio de um modelo de análise de decisão multicriterial. A definição da ferramenta multicriterial considerou, novamente, os resultados da literatura. Foram identificadas aplicações de métodos multicriteriais, inclusive no próprio SLP. Sendo assim, optou-se um utilizar o *Analytic Hierarchy Process* (AHP). O AHP foi utilizado como ferramenta de ordenação das propostas de leiautes, apresentando aquela que melhor atende as expectativas da empresa.

600 Atendidos os objetivos desta pesquisa, foi possível planejar as propostas de leiautes. Assim, foram elaboradas cinco propostas pelo método SLP, onde uma foi desenvolvida pelos gestores da empresa em questão, e cinco pelo PSO. Com as propostas estabelecidas, definiram-se os critérios para seleção pelo método AHP. Foram consideradas duas análises, a primeira utilizava os critérios do estudo de caso e a segunda os objetivos no planejamento de leiautes, conforme pesquisa bibliográfica. A estratégia de efetuar duas análises, tinha como objetivo demonstrar a generalidade do método proposto.

610 Após comparações por pares dos critérios e propostas de leiautes, do método AHP, ordenaram-se os melhores resultados. As propostas de leiautes fornecidas pelo SLP demonstraram melhor aceitação que o PSO. Visto que este atendia melhor a adjacência entre setores, pois o SLP respeita a alocação de acordo com o fluxo de material e com os códigos de importância da matriz de relacionamento. Enquanto que o PSO tem uma distribuição aleatória, o que proporciona maior variabilidade nas propostas de leiautes.

Do ponto de vista teórico, esta pesquisa contribuiu com a comparação entre dois métodos distintos para o planejamento de leiautes. O primeiro método utilizou uma ferramenta para planejamento de leiautes que está difundida na literatura por mais de cinquenta anos, o *Systematic Layout Planning* (SLP). Enquanto que segundo método considerava a aplicação de uma ferramenta mais robusta e recente, neste caso, a meta-

615 heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO). Optou-se por estes dois métodos devido às lacunas existentes na literatura, para o primeiro se sugeria a comparação por algoritmos/heurísticas/meta-heurísticas e o segundo relatos recentes indicavam o PSO. Sendo assim, compararam-se os resultados obtidos por estes dois métodos. Porém, para comparação, necessitou-se de uma ferramenta de tomada de decisões, frente a necessidade de comparações com as características de cada. Assim, optou-se em utilizar o *Analytic Hierarchy Process* (AHP). O AHP comparou, por pares, os critérios demandados pelo estudo de caso e as instâncias da literatura; devido à necessidade de generalizar o modelo para empresas de pequeno e médio porte. Planejadas as propostas de leiautes e selecionadas as melhores pelo AHP, identificou-se que para pequenas instâncias o método SLP é melhor que o PSO; devido à facilidade de planejamento. Porém quanto ao tempo este demonstrou-se bastante dispendioso. Em resumo, a contribuição teórica demonstrou que para pequenas e médias empresas, com número reduzido de setores, o SLP leva certa vantagem, porém, para grandes instâncias, o PSO se torna mais eficaz.

Economicamente, este trabalho contribuiu com ferramentas que auxiliam no planejamento das propostas de leiautes e no processo de tomada de decisão. Um planejamento eficaz de leiaute, garante a redução de custos com movimentação desnecessária de materiais, replanejamentos da planta fabril e otimização do espaço utilizado. Por mais que esta pesquisa não tenha apresentado valores monetários referente à redução de custos, este comprovou-se pela otimização do fluxo produtivo. Ou seja, a pesquisa reduziu a distância percorrida pelo material e a área total da nova fábrica da empresa em estudo.

Gerencialmente, esta pesquisa contribuiu com a proposição de métodos para planejamento de leiautes e para a tomada de decisões. Como expectativa, esperava-se que os gerentes, de empresas de pequeno e médio porte, conseguissem empregar pelo menos um destes dois métodos para o planejamento de leiautes. Desta maneira, estes optaram em utilizar o SLP, devido à sua facilidade de aplicação, permitindo a participação de todos os responsáveis pelas atividades do processo produtivo. Inclusive, uma das propostas de leiaute planejada pela empresa, foi comparada como as demais pelo método AHP. Por fim, além de fornecer dois métodos para o planejamento de leiautes, os gestores perceberam no AHP a possibilidade de aplicá-lo em outras atividades que demandassem tomar decisões frente à múltiplos critérios.

Quanto à utilização destes dois métodos por gestores de pequenas e médias empresas, sugere-se o SLP para pequenas instâncias, número reduzido de setores. E para grandes instâncias, recomenda-se a adoção do PSO. A definição de pequenas ou grandes instâncias não diz respeito à empresa ser de pequeno ou médio porte, mas ao número de setores que ela possui. Na teoria, um número reduzido de setores é inferior a quinze.

Referente ao tempo de planejamento, o SLP demanda maior tempo e outras ferramentas auxiliares para definição da melhor proposta. Já o PSO fornece o melhor leiaute sem uma ferramenta de suporte e é simulado no próprio algoritmo. E a simulação no PSO é mais rápida que no SLP, pois, após estruturação do modelo do algoritmo, basta iniciar a simulação e em questão de poucos minutos tem-se o resultado (a duração depende do critério de parada). Enquanto que no SLP é necessário uma nova estruturação para cada tipo de empresa,

<sup>650</sup> ou alteração no processo produtivo da mesma.

A combinação destes dois métodos seria a melhor solução para a questão de instâncias e aplicabilidade em empresas de pequeno e médio porte. O SLP seria utilizado para a estruturação do modelo e o PSO para planejamento de proposta de leilite. Desta maneira, pesquisas futuras poderiam desenvolver um algoritmo que utilizasse as características do SLP (proximidade entre setores de acordo com os códigos A, E, I, O, U e <sup>655</sup> X) para estruturação do modelo e as heurísticas/meta-heurísticas para planejamento (não necessariamente o PSO). Outra sugestão de pesquisa futura diz respeito ao uso deste método em outros estudos de casos, que atuem em segmentos distintos.

## Referências

- [1] Ahmadi, A., Pishvae, M. S., & Jokar, M. R. A. (2017). A survey on multi-floor facility layout problems. *Computers & Industrial Engineering*, *107*, 158–170.
- [2] Al-Hawari, T., Mumani, A., & Momani, A. (2014). Application of the analytic network process to facility layout selection. *Journal of Manufacturing Systems*, *33*, 488–497.
- [3] Allahyari, M. Z., & Azab, A. (2017). Facility layout problem for cellular manufacturing systems. In *Computational Optimization in Engineering - Paradigms and Applications*. InTech.
- [4] de Alvarenga, A. G., Negreiros-Gomes, F. J. et al. (2000). Metaheuristic methods for a class of the facility layout problem. *Journal of intelligent manufacturing*, *11*, 421–430.
- [5] Barth, M. J. (2016). *Otimização multi-nível para projeto de redes híbridas (ópticas e sem fio) para implementação de cidades inteligentes..* Master's thesis – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada São Leopoldo, RS.
- [6] Baykasoglu, A., Dereli, T., & Sabuncu, I. (2006). An ant colony algorithm for solving budget constrained and unconstrained dynamic facility layout problems. *Omega*, *34*, 385–396.
- [7] Bersani, C., Guerisoli, C., Mazzino, N., Sacile, R., & Sallak, M. (2015). A multi-criteria methodology to evaluate the optimal location of a multifunctional railway portal on the railway network. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, *5*, 78–91.
- [8] Besbes, M., Affonso, R. C., Zolghadri, M., Masmoudi, F., & Haddar, M. (2017). Multi-criteria decision making for the selection of a performant manual workshop layout: a case study. *IFAC-PapersOnLine*, *50*, 12404–12409.
- [9] Bland, J. (1999). Layout of facilities using an ant system approach. *Engineering optimization*, *32*, 101–115.
- [10] Cambron, K. E., & Evans, G. W. (1991). Layout design using the analytic hierarchy process. *Computers & industrial engineering*, *20*, 211–229.
- [11] Che, A., Zhang, Y., & Feng, J. (2017). Bi-objective optimization for multi-floor facility layout problem with fixed inner configuration and room adjacency constraints. *Computers & Industrial Engineering*, *105*, 265–276.
- [12] Chen, G. Y.-H. (2013). A new data structure of solution representation in hybrid ant colony optimization for large dynamic facility layout problems. *International Journal of Production Economics*, *142*, 362–371.

- [13] Chraïbi, A., Kharraja, S., Osman, I. H., & Elbeqqali, O. (2016). A particle swarm algorithm for solving the multi-objective operating theater layout problem. *IFAC-PapersOnLine*, *49*, 1169–1174.
- 690 [14] De Carlo, F., Arleo, M. A., Borgia, O., & Tucci, M. (2013). Layout design for a low capacity manufacturing line: a case study. *International Journal of Engineering Business Management*, *5*, 35.
- [15] Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, *31*, 255–267.
- [16] Erođlu, Y., & Seđkiner, S. U. (2012). Design of wind farm layout using ant colony algorithm. *Renewable*  
695 *Energy*, *44*, 53–62.
- [17] Fahad, M., Naqvi, S. A. A., Atir, M., Zubair, M., & Shehzad, M. M. (2017). Energy management in a manufacturing industry through layout design. *Procedia Manufacturing*, *8*, 168–174.
- [18] Feng, H., Da, W., Xi, L., Pan, E., & Xia, T. (2017). Solving the integrated cell formation and worker assignment problem using particle swarm optimization and linear programming. *Computers & Industrial*  
700 *Engineering*, *110*, 126–137.
- [19] Francis, R. L., McGinnis, L. F., & White, J. A. (1992). *Facility layout and location: an analytical approach*. (2nd ed.). Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.
- [20] García-Hernández, L., Pierreval, H., Salas-Morera, L., & Arauzo-Azofra, A. (2013). Handling qualitative aspects in unequal area facility layout problem: An interactive genetic algorithm. *Applied Soft*  
705 *Computing*, *13*, 1718–1727.
- [21] Geldermann, J., & Schöbel, A. (2011). On the similarities of some multi-criteria decision analysis methods. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, *18*, 219–230.
- [22] Gil, A. C. (2017). *Como elaborar projetos de pesquisa*. (6th ed.). São Paulo: Atlas.
- [23] Gonçalves, J. F., & Resende, M. G. (2015). A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, *246*, 86–107.  
710
- [24] Hafiz, F., & Abdennour, A. (2016). Particle swarm algorithm variants for the quadratic assignment problems—a probabilistic learning approach. *Expert Systems with Applications*, *44*, 413–431.
- [25] Hahn, B., & Valentine, D. T. (2016). *Essential MATLAB for engineers and scientists*. Academic Press.
- [26] Hammad, A. W., Rey, D., & Akbarnezhad, A. (2017). A cutting plane algorithm for the site layout planning problem with travel barriers. *Computers & Operations Research*, *82*, 36–51.  
715

- [27] Hamzheei, M., Farahani, R. Z., & Rashidi-Bajgan, H. (2013). An ant colony-based algorithm for finding the shortest bidirectional path for automated guided vehicles in a block layout. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 399–409.
- [28] Hani, Y., Amodeo, L., Yalaoui, F., & Chen, H. (2007). Ant colony optimization for solving an industrial layout problem. *European Journal of Operational Research*, 183, 633–642.
- [29] Heragu, S. S., & Kusiak, A. (1991). Efficient models for the facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 53, 1–13.
- [30] Huang, H.-H., May, M.-D., Huang, H.-M., & Huang, Y.-W. (2010). Multiple-floor facilities layout design. In *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics* (pp. 165–170). IEEE.
- [31] Hunt, B. R., Lipsman, R. L., & Rosenberg, J. M. (2014). *A guide to MATLAB: for beginners and experienced users*. Cambridge University Press.
- [32] Izadinia, N., & Eshghi, K. (2016). A robust mathematical model and aco solution for multi-floor discrete layout problem with uncertain locations and demands. *Computers & Industrial Engineering*, 96, 237–248.
- [33] Jia, Q., & Seo, Y. (2013). Solving resource-constrained project scheduling problems: conceptual validation of flp formulation and efficient permutation-based abc computation. *Computers & Operations Research*, 40, 2037–2050.
- [34] Jiang, S., & Nee, A. (2013). A novel facility layout planning and optimization methodology. *CIRP Annals*, 62, 483 – 486. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.133>.
- [35] Joseph, T. P. (2006). Design a lean laboratory layout. *Medical Laboratory Observer*, 38, 24.
- [36] Kang, S., & Chae, J. (2017). Harmony search for the layout design of an unequal area facility. *Expert Systems with Applications*, 79, 269–281.
- [37] Kulturel-Konak, S. (2017). A matheuristic approach for solving the dynamic facility layout problem. *Procedia Computer Science*, 108, 1374–1383.
- [38] Kulturel-Konak, S., & Konak, A. (2011). Unequal area flexible bay facility layout using ant colony optimisation. *International Journal of Production Research*, 49, 1877–1902.
- [39] Kursunoglu, N., & Onder, M. (2015). Selection of an appropriate fan for an underground coal mine using the analytic hierarchy process. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 48, 101–109.

- 745 [40] Kusiak, A., & Heragu, S. S. (1987). The facility layout problem. *European Journal of operational research*, *29*, 229–251.
- [41] Lacerda, D. P., Dresch, A., Proença, A., & Antunes Júnior, J. (2013). Design science research: método de pesquisa para a engenharia de produção. *Gestão & Produção*, *20*, 741–761.
- 750 [42] Lai, P.-L., Potter, A., Beynon, M., & Beresford, A. (2015). Evaluating the efficiency performance of airports using an integrated ahp/dea-ar technique. *Transport Policy*, *42*, 75–85.
- [43] Liu, J., Zhang, H., He, K., & Jiang, S. (2018). Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on objective space division for the unequal-area facility layout problem. *Expert Systems with Applications*, *102*, 179–192.
- 755 [44] Liu, K.-H., Hwang, S.-L., Hsieh, M.-H., Liang, S.-F. M., & Chuang, C.-F. (2016). Systematic layout planning in human–system interface: An evaluation of alarm displays with spatial proximity for accidents diagnosis of advanced boiling water reactor. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *51*, 30–42.
- [45] Manita, G., & Korbaa, O. (2013). A hybrid genetic algorithm for solving machine layout problem with consideration of industrial constraints. *IFAC Proceedings Volumes*, *46*, 2039–2044.
- [46] Manson, N. (2006). Is operations research really research? *Orion*, *22*, 155–180.
- 760 [47] Meller, R. D., & Gau, K.-Y. (1996). The facility layout problem: recent and emerging trends and perspectives. *Journal of manufacturing systems*, *15*, 351–366.
- [48] Meller, R. D., Narayanan, V., & Vance, P. H. (1998). Optimal facility layout design. *Operations Research Letters*, *23*, 117–127.
- 765 [49] Miguel, P. A. C. (2007). Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Production*, *17*, 216–229.
- [50] Miguel, P. A. C. (2012). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro:: Elsevier.
- [51] Mohan, T. K., & Pillai, V. M. (2013). Detailed dynamic layout planning: An adaptive layout approach. *IFAC Proceedings Volumes*, *46*, 2027–2032.
- 770 [52] Nasab, H. H. (2014). A hybrid fuzzy-ga algorithm for the integrated machine allocation problem with fuzzy demands. *Applied Soft Computing*, *23*, 417–431.
- [53] Niroomand, S., Hadi-Vencheh, A., Şahin, R., & Vizvári, B. (2015). Modified migrating birds optimization algorithm for closed loop layout with exact distances in flexible manufacturing systems. *Expert Systems with Applications*, *42*, 6586–6597.

- 775 [54] Ojaghi, Y., Khademi, A., Yusof, N. M., Renani, N. G., & bin Syed Hassan, S. A. H. (2015). Production layout optimization for small and medium scale food industry. *Procedia Cirp*, 26, 247–251.
- [55] Paes, F. G., Pessoa, A. A., & Vidal, T. (2017). A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 256, 742–756.
- [56] Papadaki, I. N., & Chassiakos, A. P. (2016). Multi-objective construction site layout planning using  
780 genetic algorithms. *Procedia engineering*, 164, 20–27.
- [57] Pourvaziri, H., & Naderi, B. (2014). A hybrid multi-population genetic algorithm for the dynamic facility layout problem. *Applied Soft Computing*, 24, 457–469.
- [58] Prodanov, C. C., & de Freitas, E. C. (2013). *Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico*. (2nd ed.). Novo Hamburgo:: Feevale.
- 785 [59] Razmak, J., & Aouni, B. (2015). Decision support system and multi-criteria decision aid: A state of the art and perspectives. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 22, 101–117.
- [60] Safarzadeh, S., & Koosha, H. (2017). Solving an extended multi-row facility layout problem with fuzzy clearances using ga. *Applied Soft Computing*, 61, 819–831.
- [61] Silva, E. L. d., & Menezes, E. M. (2005). *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. (4th ed.).  
790 Florianópolis:: UFSC.
- [62] Silva, F. d. A. S. e., & de Azevedo, C. A. V. (2016). The assistat software version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. *African Journal of Agricultural Research*, 11, 3733–3740.
- [63] Singh, A. P., & Yilma, M. (2013). Production floor layout using systematic layout planning in can manufacturing company. In *Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2013 International  
795 Conference on* (pp. 822–828). IEEE.
- [64] Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., Frazelle, E. H., Tanchoco, J. M. A., & Trevino, J. (1996). *Facilities Planning*. (2nd ed.). New York:: John Willey and Sons.
- [65] Tortorella, G. L., & Fogliatto, F. S. (2008). Planejamento sistemático de layout com apoio de análise de decisão multicritério. *Production*, 18, 609–624.
- 800 [66] Ulutas, B., & Islier, A. A. (2015). Dynamic facility layout problem in footwear industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 55–61.
- [67] Wang, S., Zuo, X., Liu, X., Zhao, X., & Li, J. (2015). Solving dynamic double row layout problem via combining simulated annealing and mathematical programming. *Applied Soft Computing*, 37, 303–310.

- [68] Wey, W.-M., & Hsu, J. (2014). New urbanism and smart growth: Toward achieving a smart national taipei university district. *Habitat International*, *42*, 164–174.  
805
- [69] Xiao, Y., Xie, Y., Kulturel-Konak, S., & Konak, A. (2017). A problem evolution algorithm with linear programming for the dynamic facility layout problem—a general layout formulation. *Computers & Operations Research*, *88*, 187–207.
- [70] Yarpiz (2015). Facility layout design and location allocation in matlab. URL: <http://yarpiz.com/378/ypap109-layout-design>.  
810
- [71] Yin, R. K. (2013). *Case study research: Design and methods*. Sage publications.
- [72] Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Bagočius, V. (2015). Multi-criteria selection of a deep-water port in the eastern baltic sea. *Applied Soft Computing*, *26*, 180–192.