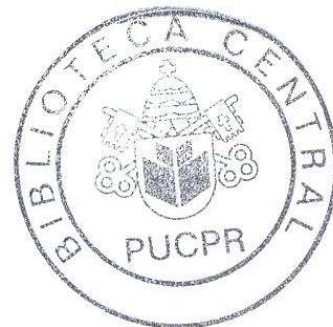


VALDAIR CANDIDO MARTINS



OTIMIZAÇÃO DE LAYOUT EM AMBIENTES INDUSTRIAIS REALISTAS USANDO BUSCA TABU

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Informática Aplicada da Pontifícia Universidade
Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Informática Aplicada.

Área de Concentração: Metodologias e Técnicas de
Computação

Orientador: Prof. Dr. Marco A. B. Cândido

Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo F. Pacheco

CURITIBA

2002

Martins, Valdair Candido.

Otimização de Layout em Ambientes Industriais Realistas Usando Busca Tabu.
Curitiba, 2002. 132p.

Dissertação – Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada.

1. Layout 2. *Benchmark* 3. Otimização 4. Busca Tabu. I. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada.



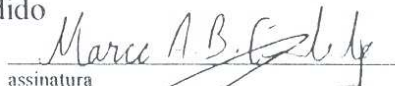
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA APLICADA
DA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 053

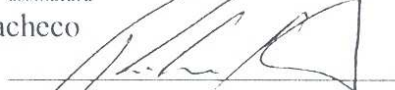
Aos 22 dias do mês de março de 2002 realizou-se a sessão pública de defesa da dissertação **“Otimização de Layout em Ambientes Industriais Realistas Usando Busca Tabu”**, apresentada por **Valdair Candido Martins** como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Informática Aplicada**, perante uma Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Marco A. B. Cândido
PUCPR (Presidente)


assinatura

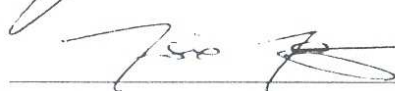
APROV
parecer (aprov/ reprov.)

Prof. Dr. Ricardo Ferrari Pacheco
PUCPR



APROV

Prof. Dr. Fabio Favaretto
PUCPR



APROV

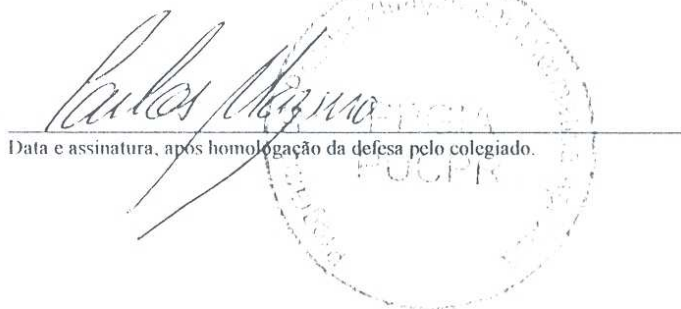
Prof. Dr. Felipe Martins Müller
UFSM



APROV

Conforme as normas regimentais do PPGIA e da PUCPR, o trabalho apresentado foi considerado APROVADO (aprovado/reprovado), segundo avaliação da maioria dos membros desta Banca Examinadora. Este resultado está condicionado ao cumprimento integral das solicitações da Banca Examinadora, conforme registrado no Livro de Defesas do programa.

Prof. Dr. Carlos Maziero
Diretor do PPGIA PUCPR


Data e assinatura, após homologação da defesa pelo colegiado.

Agradecimentos

“...Obrigado Senhor, pelos meus pais e amigos e por todos aqueles que entraram na minha história e me ensinaram a crescer, a ser mais gente; pelo término desta longa jornada, o mais sincero agradecimento a Ti que me confiaste a vida. Através de minha fé, de minhas orações, de meu amor, te agradeço por tudo que fui, que sou e ainda serei e, principalmente, por nunca me desamparar em momentos difíceis me permitindo chegar até aqui....¹”

À minha família, que sempre me apoiou, incentivando-me em todos os momentos dando-me forças para continuar o trabalho.

Ao Professor e Orientador Dr. Marco A. B. Cândido, pela idealização e profundas contribuições para realização deste trabalho.

Ao Co-orientador Dr. Ricardo F. Pacheco, pelas valiosas contribuições para o êxito na conclusão deste trabalho.

Aos Professores Dr. Edson Emílio Scalabrin e Dr. Marcos Augusto Shmeil pelas contribuições e sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho.

À PUCPR, pelo apoio financeiro.

Aos funcionários e professores do Programa de Pós Graduação em Informática Aplicada (PPGIA), pela disponibilidade em ajudar.

Aos amigos, Cláudio de Oliveira, Bruno Garcia, Orlando A. Soares, Luiz A. Neves, José Geraldo, Paulo Vinicius, pela convivência e troca de experiências que com certeza, ajudaram-me a evoluir um pouco mais como ser humano e também como profissional, e a todos aqueles que colaboram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“...A Deus a quem, no corre-corre de nossas conquistas diárias, esquecemos tantas vezes de agradecer.¹”

¹ Trecho final do discurso de formatura dos formandos em Engenharia de Computação da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 1998, Curitiba, Paraná.

Sumário

Agradecimentos	vi
Sumário	vii
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Equações	xv
Lista de Símbolos	xvi
Lista de Abreviações	xviii
Resumo	xx
Abstract	xxi

Capítulo 1

Introdução	1
1.1 Desafio.....	4
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo geral.....	5
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4 Contribuição	6
1.5 Organização da dissertação	7

Capítulo 2

O problema de layout em sistemas de manufatura	8
2.1.1 Diagramas de fluxo.....	9
2.1.2 Análise do fluxo de produção	9
2.2 Tipos de layout.....	10
2.2.1 Layout de produto estático	10
2.2.2 Layout orientado ao produto	10
2.2.3 Layout orientado à família de produto.....	12
2.2.4 Layout orientado ao processo.....	13
2.3 Considerações sobre o capítulo.....	15

Capítulo 3

Revisão bibliográfica	16
3.1 Introdução	16
3.2 “ <i>Quadratic Assignment Problem</i> ” - QAP.....	17
3.3 Teoria de Grafos.....	18
3.4 “Mixed Integer Program” - MIP	18
3.5 “Hierarchical Approach” - Árvore Binária.....	19
3.6 Algoritmos para o problema de layout.....	20
3.6.1 Algoritmos para obtenção de solução ótima.....	20
3.6.2 Algoritmos para obtenção de soluções sub-ótimas	21
3.7 Simulações.....	25

Capítulo 4

Escopo do problema abordado	26
4.1 Restrições geométricas	27
4.2 Restrições de localização.....	29
4.3 Distância	30
4.4 Função objetivo.....	31
4.5 Considerações sobre o capítulo.....	33

Capítulo 5

Abordagem utilizada	34
5.1 Busca tabu.....	34
5.2 Visão do geral do sistema.....	37
5.3 Definição da área total disponível.....	38
5.4 Algoritmo de construção	39
5.4.1 Obtenção da Solução Inicial Viável (SIV).....	39
5.5 Algoritmo de alocação.....	41
5.6 Algoritmo de refinamento	43
5.7 Elementos da busca tabu	44
5.7.1 Representação da solução	44
5.7.2 Tamanho da lista tabu adotada	44
5.7.3 Estrutura de vizinhança adotada.....	45
5.7.4 Estratégia de Proibição e de Liberação.....	47
5.7.5 Critério de aspiração	48
5.7.6 Critério de parada	48
5.8 Considerações sobre o capítulo.....	48

Capítulo 6

Metodologia de análise do problema	50
6.1 Materiais e Métodos	50
6.1.1 Materiais	50
6.1.2 Métodos	51

Capítulo 7

Resultados e discussões	54
7.1 Resultados.....	54
7.2 Validação dos Resultados.....	58
7.3 Considerações sobre o capítulo.....	59

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros 61

- 8.1 Conclusões..... 61
- 8.2 Trabalhos Futuros 64

Anexo A

Dados de entrada 65

- A.1 Matrizes de fluxos 65
- A.2 Características geométricas..... 69

Anexo B

Bateria de testes 71

- B.1 Layouts finais - Primeira bateria de testes 72
- B.2 Layouts finais - Segunda bateria de testes 77
- B.3 Layouts finais - Terceira bateria de testes 81

Anexo C

Problemas propostos 84

- C.1 Teste com 40 departamentos..... 84
 - C.1.1Características geométricas..... 84
 - C.1.2Matriz de fluxos..... 86
 - C.1.3Layout final – 40 departamentos 87
- C.2 Teste com 55 departamentos..... 88
 - C.2.1Características geométricas..... 88
 - C.2.2Matriz de fluxos..... 90
 - C.2.3Layout final – 55 departamentos 91

Anexo D

AVOLI 92

- D.1 Introdução 92
 - D.1.1 Bem-vindo 92
 - D.1.2 Instalação do AVOLI 92
 - D.1.3 AVOLI – Ambiente..... 92
 - D.1.4 Acesso..... 93
 - D.1.5 Área de Trabalho do AVOLI 95

D.1.6 Exemplo - Dados de entrada	95
D.1.7 Exemplo – Saída de Dados	99
Índice Remissivo	103
Referências Bibliográficas	107

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1 Planta com layout por linha de produção [ASK93].</i>	11
<i>Figura 2.2 Padrões de fluxo de material - linha de produção [ASK93].</i>	12
<i>Figura 2.3 Planta com layout por família de produto [ASK93].</i>	12
<i>Figura 2.4 Planta com layout por processo [ASK93].</i>	13
<i>Figura 2.5 Volume versus variedade [ASK93].</i>	15
<i>Figura 3.1 Árvore binária de particionamento [TAM91].</i>	19
<i>Figura 3.2 Layout gerado na região de particionamento [TAM91].</i>	20
<i>Figura 4.1 Layout com espaços ocupados [TAM91].</i>	29
<i>Figura 5.1 Fluxograma – Visão geral do sistema.</i>	37
<i>Figura 5.2 Fluxograma - Área do quadro externo gerada automaticamente.</i>	38
<i>Figura 5.3 Fluxograma - Solução inicial.</i>	40
<i>Figura 5.4 Fluxograma – Algoritmo de alocação VCM.</i>	42
<i>Figura 5.5 Fluxograma – Algoritmo ABTA.</i>	43
<i>Figura 5.6 Fluxograma – Algoritmo AMT.</i>	44
<i>Figura 5.7 Configurações tabu e vizinhança.</i>	47
<i>Figura 8.1 Área de trabalho do AVOLI.</i>	71
<i>Figura 8.2 Layout final – teste 1x1 com 5 deptos.</i>	72
<i>Figura 8.3 Layout final – teste 1x1 com 6 deptos.</i>	72
<i>Figura 8.4 Layout final – teste 1x1 com 7 deptos.</i>	73
<i>Figura 8.5 Layout final – teste 1x1 com 8 deptos.</i>	73
<i>Figura 8.6 Layout final – teste 1x1 com 12 deptos.</i>	74
<i>Figura 8.7 Layout final – teste 1x1 com 15 deptos.</i>	74
<i>Figura 8.8 Layout final – teste 1x1 com 20 deptos.</i>	75
<i>Figura 8.9 Layout final – teste 1x1 com 30 deptos.</i>	75
<i>Figura 8.10 Layout final – teste 1x1 com 40 deptos.</i>	76
<i>Figura 8.11 Layout final - teste com 5 deptos.</i>	77
<i>Figura 8.12 Layout final - teste com 6 deptos.</i>	77
<i>Figura 8.13 Layout final - teste com 7 deptos.</i>	78
<i>Figura 8.14 Layout final - teste com 8 deptos.</i>	78
<i>Figura 8.15 Layout final - teste com 12 deptos.</i>	79
<i>Figura 8.16 Layout final - teste com 15 deptos.</i>	79

<i>Figura 8.17 Layout final - teste com 20 deptos.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 8.18 Layout final - teste com 30 deptos.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 8.19 Layout final - teste com 8 deptos.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 8.20 Layout final - teste com 12 deptos.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 8.21 Layout final - teste com 15 deptos.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 8.22 Layout final - teste com 20 deptos.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 8.23 Layout final - teste com 30 deptos.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 8.24 Layout final - teste com 40 deptos.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 8.25 Layout final - teste com 55 departamentos.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 8.26 – Interface de acesso ao sistema.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 8.27 – Barra de Menu</i>	<i>93</i>
<i>Figura 8.28 – Menu Geral</i>	<i>94</i>
<i>Figura 8.29 – Menu Ações.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 8.30 –Menu Ferramentas</i>	<i>94</i>
<i>Figura 8.31 –Utilitário Cálculos Diversos.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 8.32 –Menu Processo.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 8.33 – Guia Ambiente.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 8.34 – Guia Áreas Ocupadas.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 8.35 – Guia Departamentos Fixos.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 8.36 – Guia Departamentos Móveis</i>	<i>97</i>
<i>Figura 8.37 – Guia Configurações Iniciais.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 8.38 – Histórico do conjunto de soluções visitadas.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 8.39 – Solução inicial – Gráfico de melhoria em percentual</i>	<i>99</i>
<i>Figura 8.40 – Gráfico de evolução da busca Tabu.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 8.41 – Melhores soluções geradas.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 8.42 – Solução Final Detalhada.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 8.43 – Resumo dos resultados</i>	<i>101</i>
<i>Figura 8.44 – Log de resultados</i>	<i>102</i>
<i>Figura 8.45 –Layout gráfico - Representação em 2D.....</i>	<i>102</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1 Características gerais para os tipos de layouts [ASK93].</i>	15
<i>Tabela 4.1 Comparativo de restrições.</i>	32
<i>Tabela 5.1 Estrutura da matriz tabu.</i>	46
<i>Tabela 7.1 Desempenho do algoritmo para problemas 1x1.</i>	55
<i>Tabela 7.2 Testes comparativos – [NUG68], [TAT95], [SUR95] e [CHI01].</i>	55
<i>Tabela 7.3 Desempenho do algoritmo usando [NUG68] e [TAM91].</i>	56
<i>Tabela 7.4 Resultados considerando-se restrições de adjacência e de localização.</i>	57
<i>Tabela 7.5 Resultados – Problemas propostos.</i>	59
<i>Tabela 8.1 Matriz de fluxo – para 5 deptos.</i>	65
<i>Tabela 8.2 Matriz de fluxo – para 6 deptos.</i>	65
<i>Tabela 8.3 Matriz de fluxo – para 7 deptos.</i>	66
<i>Tabela 8.4 Matriz de fluxo – para 8 deptos.</i>	66
<i>Tabela 8.5 Matriz de fluxo – para 12 deptos.</i>	66
<i>Tabela 8.6 Matriz de fluxo – para 15 deptos.</i>	67
<i>Tabela 8.7 Matriz de fluxo – para 20 deptos.</i>	67
<i>Tabela 8.8 Matriz de fluxo – para 30 deptos.</i>	68
<i>Tabela 8.9 Matriz de fluxo – teste 1x1 com 40 deptos.</i>	68
<i>Tabela 8.10 Características geométricas – testes 1x1.</i>	69
<i>Tabela 8.11 Características geométricas – testes - [TAM91].</i>	70
<i>Tabela 8.12. Áreas ocupadas para 40 departamentos</i>	84
<i>Tabela 8.13. Características geométricas para 40 departamentos</i>	85
<i>Tabela 8.14. Matriz de fluxo – 40 departamentos</i>	86
<i>Tabela 8.15. Áreas ocupadas para 55 departamentos</i>	88
<i>Tabela 8.16 Características geométricas dos deptos Fixos</i>	89
<i>Tabela 8.17 Características geométricas dos deptos Móveis.</i>	89
<i>Tabela 8.18 Matriz de fluxo – 55 departamentos.</i>	90

Lista de Equações

<i>Equação 4.1</i>	30
<i>Equação 4.2</i>	30
<i>Equação 4.3</i>	31
<i>Equação 5.1</i>	45

Lista de Símbolos

i	Departamento i
j	Departamento j ou localização j
$P_i(x_i, y_i)$	Um ponto qualquer de coordenadas x_i, y_i
S	Solução inicial
S'	Solução vizinha a S
$V(S)$	Conjunto de soluções vizinhas a S
S_{melhor}	Melhor solução na vizinhança $N(S)$
T	Tempo tabu
T_{min}	Limite inferior da lista tabu dinâmica
$T_{\text{máx}}$	Limite superior da lista tabu dinâmica
L	Lista tabu
n	Número de departamentos fixos mais móveis
ms	Total de departamentos móveis
fs	Total de departamentos fixos
$-$	Sinal “-“ departamentos do tipo fixos
$+$	Sinal “+“ departamentos do tipo móveis
$C(h)$	Comprimento – Lado medido na horizontal
$L(v)$	Largura – Lado medido na vertical
V	Departamento com orientação vertical dentro do layout
H	Departamento com orientação horizontal dentro do layout
f_{ij}	Fluxo entre o departamento i e o departamento j
d_{ij}	Distância retangular centro-a-centro entre o departamento i e o departamento j
a_i	Razão de aspecto do departamento i
$a_{i(\text{min})}$	Razão de aspecto mínima do departamento i
$a_{i(\text{máx})}$	Razão de aspecto máxima do departamento i

β_i	Razão de área morta do departamento i
$\beta_{i(\max)}$	Razão de área morta máxima do departamento i
k	Número de departamentos não posicionados no layout
l	Número de departamentos que deveriam manter uma borda comum (deveriam ficar próximos um do outro e não ficaram).
m	Número de departamentos que não deveriam manter uma borda comum (deveriam ficar afastados um do outro e não ficaram).
M	Big M - Variável de penalização

Lista de Abreviações

2D	Bidimensional
ABTA	Algoritmo de busca tabu adaptado
AG	Algoritmo genético
ALDEP	Automated Layout Design Program
AMT	Algoritmo Matriz Tabu
ATN	Algoritmo Área Total Necessária
AVOLI	Ambiente Visual para Otimização de Layout Industrial
BT	Busca tabu
CAD	Computer Aided Design
COFAD	Computerized Facilities Design
CORELAP	Computerized Relationship Layout Planning
CRAFT	Computerized Relative Allocation of Facilities Technique
FLAC	Facility Layout by Analysis of Clusters
GA	Genetic Algorithm
LASP	Laboratório de Sistemas Produtivos
LB	Lower Bound
MAT	Modular Allocation Technique
MIP	Mixed Integer Program
PLANET	Plant Layout Analysis and Evaluation Technique
PPGIA	Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada
PTE	Estrutura de vizinhança Pseudo Troca Expandida
PTS	Estrutura de vizinhança Pseudo Troca Simples
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
QAP	Quadratic Assignment Problem
SA	Simulated Annealing

SIV	Algoritmo Solução Inicial Viável
TS	Tabu Search
TSS	Estrutura de vizinhança Troca Simples
TTA	Tempo Tabu Aleatório
TTF	Tempo Tabu Fixo
TTV	Tempo Tabu Variável
VCM	Algoritmo de Alocação
UB	Upper Bound

Resumo

Este trabalho evidencia o problema do layout de fábrica e apresenta a ferramenta computacional AVOLI (Ambiente Visual para Otimização de Layout Industrial) que auxiliará projetistas e engenheiros de produção na geração de layouts que contemplem restrições reais. A ferramenta foi desenvolvida para resolver problemas que envolvam layouts com restrições geométricas e de localizações, fornecendo ao projetista informações que irão auxiliá-lo na tomada de decisão. O sistema fornece saídas gráficas em 2D, entre elas um desenho em blocos dos departamentos devidamente identificados e gráficos que permitem acompanhar o processo de evolução do refinamento da solução inicial. Sua performance pôde ser comprovada através de testes em problemas *benchmark* e em problemas que refletem ambientes industriais em situações realistas. Em sua forma geral, o problema de layout é um problema de otimização combinatória que surge em uma variedade de ambientes de produção. Assim, dispor fisicamente os diversos departamentos que compõem uma planta industrial de modo a otimizar recursos, levando-se em conta fatores tanto quantitativos quanto qualitativos, caracteriza a complexidade do problema, uma vez que ambientes realistas possuem uma grande quantidade de restrições. Buscamos com esta ferramenta minimizar os custos de produção, otimizar a qualidade intrínseca do produto, permitir a gestão dos custos de projeto (construção e/ou modificação), promover o uso efetivo das máquinas e equipamentos, espaço e energia, bem como, proporcionar ao empregado, conveniência, segurança e conforto. Aplicou-se a metaheurística busca tabu com as devidas adaptações para se atingir o objetivo deste estudo que é a otimização de layout em ambientes industriais realistas.

Palavras chave: 1 - Layout; 2 - Otimização; 3 - *Benchmark*; 4 - Busca Tabu.

Resumo

Este trabalho evidencia o problema do layout de fábrica e apresenta a ferramenta computacional AVOLI (Ambiente Visual para Otimização de Layout Industrial) que auxiliará projetistas e engenheiros de produção na geração de layouts que contemplem restrições reais. A ferramenta foi desenvolvida para resolver problemas que envolvam layouts com restrições geométricas e de localizações, fornecendo ao projetista informações que irão auxiliá-lo na tomada de decisão. O sistema fornece saídas gráficas em 2D, entre elas um desenho em blocos dos departamentos devidamente identificados e gráficos que permitem acompanhar o processo de evolução do refinamento da solução inicial. Sua performance pôde ser comprovada através de testes em problemas *benchmark* e em problemas que refletem ambientes industriais em situações realistas. Em sua forma geral, o problema de layout é um problema de otimização combinatória que surge em uma variedade de ambientes de produção. Assim, dispor fisicamente os diversos departamentos que compõem uma planta industrial de modo a otimizar recursos, levando-se em conta fatores tanto quantitativos quanto qualitativos, caracteriza a complexidade do problema, uma vez que ambientes realistas possuem uma grande quantidade de restrições. Buscamos com esta ferramenta minimizar os custos de produção, otimizar a qualidade intrínseca do produto, permitir a gestão dos custos de projeto (construção e/ou modificação), promover o uso efetivo das máquinas e equipamentos, espaço e energia, bem como, proporcionar ao empregado, conveniência, segurança e conforto. Aplicou-se a metaheurística busca tabu com as devidas adaptações para se atingir o objetivo deste estudo que é a otimização de layout em ambientes industriais realistas.

Palavras chave: 1 - Layout; 2 - Otimização; 3 - *Benchmark*; 4 - Busca Tabu.

Abstract

This work evidences the factory layout problem and it presents the computational tool AVOLI (Visual Environment for Optimization of Industrial Layout) that will aid planners and production engineers in the generation of layouts that contemplate real restrictions. The tool was developed to solve problems that involve layouts with geometric constraints and of locations, supplying to the planner information that will aid him to take of decision. The system supplies graphic outputs in 2D, among them a drawing in blocks of the departments properly identified and graphs that allow accompanying the initial solution evolution process. Your performance could be proven through tests in *benchmark* problems and in problems that reflect industrial environments in realistic situations. In your general form, the layout problem is a combinatorial optimization problem that appears in a variety of production environment. Therefore, disposal physically the several departments that compose a plant industrial way realist to optimize resources, being considered factors so much quantitative as qualitative, it characterizes the complexity of the problem. This tool has focused to minimize the production costs, to optimize the intrinsic quality of the product, to allow the administration of the project costs (construction and/or modification), to promote the effective use of the machines and equipments, space and energy, as well as, to provide to the employee, convenience, safety and comfort. Tabu Search was applied it with the due adaptations to reach the objective of this study that is the layout optimization in a realist industrial environment.

Keywords: 1 - Layout; 2 – Optimization; 3 - *Benchmark*; 4 – Tabu Search.

Abstract

This work evidences the factory layout problem and it presents the computational tool AVOLI (Visual Environment for Optimization of Industrial Layout) that will aid planners and production engineers in the generation of layouts that contemplate real restrictions. The tool was developed to solve problems that involve layouts with geometric constraints and of locations, supplying to the planner information that will aid him to take of decision. The system supplies graphic outputs in 2D, among them a drawing in blocks of the departments properly identified and graphs that allow accompanying the initial solution evolution process. Your performance could be proven through tests in *benchmark* problems and in problems that reflect industrial environments in realistic situations. In your general form, the layout problem is a combinatorial optimization problem that appears in a variety of production environment. Therefore, disposal physically the several departments that compose a plant industrial way realist to optimize resources, being considered factors so much quantitative as qualitative, it characterizes the complexity of the problem. This tool has focused to minimize the production costs, to optimize the intrinsic quality of the product, to allow the administration of the project costs (construction and/or modification), to promote the effective use of the machines and equipments, space and energy, as well as, to provide to the employee, convenience, safety and comfort. Tabu Search was applied it with the due adaptations to reach the objective of this study that is the layout optimization in a realist industrial environment.

Keywords: 1 - Layout; 2 – Optimization; 3 - *Benchmark*; 4 – Tabu Search.

através de meios analíticos uma vez que estes problemas envolvem um grande conjunto de combinações viáveis e possuem características subjetivas que dificultam um tratamento puramente matemático. Além disso, o layout industrial engloba fatores quantitativos e qualitativos que associados, poderão tornar-se difíceis de serem modelados e analisados quando apenas técnicas convencionais são usadas.

O problema de layout tem sido amplamente estudado, porém encontram-se poucos trabalhos reportados na literatura que consideram restrições geométricas, tais como a existência de pilares usados na sustentação da construção, a existência de áreas ocupadas no interior da construção (por exemplo: escadas, elevadores, sistemas de ar condicionado, sistemas de ventilação, sistemas de resfriamento ou aquecimento, entre outras) e que, portanto, não podem ser usadas para a alocação dos departamentos [TAM91], [TAM92], [FUR97] e [TAM98]. Encontram-se também poucos trabalhos que consideram restrições de localização, tais como, um departamento deve ocupar uma localização específica dentro da fábrica, ou dois departamentos devem ficar afastados um do outro. Outras restrições de localização também devem ser consideradas por refletir casos realistas.

Usando abordagens convencionais não se consegue resolver este tipo de problema em um tempo computacional razoável, pois o problema de layout é um problema de otimização discreta que pertence a classe de problemas NP-Completo [GAR79]. Geralmente problemas desta natureza não podem ser resolvidos otimamente em tempo polinomial, por demandar um tempo computacional exageradamente grande. Recentes avanços nas ferramentas computacionais e a criação de novas técnicas, tais como algoritmos de aproximação que podem encontrar soluções boas (bem próximo do ótimo), em um tempo computacional razoável, estão permitindo que novas abordagens (Metaheurísticas) como o Algoritmo Genético (*Genetic algorithm* – GA) [HOL75], Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* – SA) [KIR83] e a Busca Tabu (*Tabu Search* – TS) [GLO89a] e [GLO89b] entre outras, sejam aplicadas com muito sucesso para resolver problemas de otimização combinatória. Tradicionalmente em situações práticas, o desenvolvimento e a avaliação de layouts tem sido realizado de forma subjetiva por projetistas que muitas vezes recorrem a técnicas gráficas.

A fim de encontrarmos soluções ótimas, considerando a complexidade do problema, usaremos a metaheurística busca tabu como sendo o principal mecanismo para atingirmos nossas expectativas em relação ao problema tratado, visto que os resultados obtidos por esta

Capítulo 1

Introdução

「A questão do layout industrial está relacionada com o localização e o arranjo dos departamentos, células ou máquinas dentro da fábrica.」 Este problema é normalmente encontrado no campo da engenharia de produção industrial. Uma das maiores preocupações de engenheiros e projetistas envolvidos com a definição do layout é a determinação da melhor localização relativa para cada um dos departamentos dentro de uma dada área. Assim, encontrar a estruturação detalhada da distribuição física de uma planta industrial, comercial ou de serviços que objetiva melhorar a comunicação entre pessoas, melhorar a movimentação de materiais, reduzir o tempo de processamento, bem como os custos de manipulação de materiais, é o que se espera de um bom layout.

「O problema basicamente se resume em determinar o layout final de um sistema de manufatura, onde cada departamento possui necessidades particulares tais como: quantidade de área, aspecto (formato), orientação, relações de adjacências, entre outras; e mantém um conjunto de interações específicas com os demais departamentos que interagem no sistema. Estas interações podem ocorrer na forma de recursos, material, ou informações do fluxo de pessoas, materiais ou da produção.」

Os objetivos dos engenheiros e projetistas envolvidos na solução dos problemas de layout são muitos, por exemplo: minimizar os custos de manipulação de materiais, maximizar a proximidade dos departamentos, racionalizar o espaço disponível, cuidar da segurança do trabalho e tratar das questões ergonômicas do sistema produtivo a fim de propiciar ao empregado satisfação em seu ambiente de trabalho.

Por causa dos aspectos geométricos e combinatoriais do problema e de acordo com o incremento de variáveis (restrições) no sistema, torna-se muito difícil encontrar soluções ótimas. Assim, problemas envolvendo layouts são complexos e difíceis de serem tratados

técnica em outros problemas de otimização discreta, tais como problemas de *Scheduling* e balanceamento de linha [GLO97] e [REE93], têm sido muito bons.

Buscamos com este trabalho desenvolver um layout de fábrica viável e eficiente. A *eficiência* de um dado layout pode ser medida pelo arranjo físico dos departamentos e por interações que ocorrem entre eles. Uma vez que a eficiência do layout de fábrica está intimamente relacionada com a manipulação de materiais [OLI99], ela pode ser medida em termos dos custos gerados pela manipulação de materiais no ambiente fabril [FRA92]. A *viabilidade* de um layout é aceita quando satisfaz as necessidades de cada departamento, considerando-se que nenhuma restrição imposta seja violada [MEL96].

1.1 Desafio

Otimizar o layout de ambientes industriais realistas usando a metaheurística busca tabu com o intuito de minimizar os custos relacionados a tais ambientes.

1.2 Motivação

Encontrar um layout de fábrica que permita a redução de custos é se preocupar em achar o arranjo mais eficiente de n departamentos indivisíveis com exigências de área desiguais dentro de uma região que permita minimizar os custos de produção expressados em termos do fluxo de materiais e da distância entre os departamentos, considerando a complexidade de um ambiente industrial traduzida por um conjunto de restrições. Portanto, objetivando otimizar o layout de fábrica, enfocaremos o problema do layout em um ambiente industrial realista.

Sabe-se que a geração de layouts ótimos tem sido um problema de difícil solução por pertencer à classe dos NP-Completo [GAR79], isto é, não existe algoritmo capaz de encontrar a solução ótima de um problema de grandes proporções em tempo polinomial. Assim, considerando a grande diversificação de produtos e serviços, as exigências do mercado que orientam a produção para as necessidades do cliente e a preocupação da empresa em obter baixos custos com alta produtividade, além da pressão exercida pelo mercado para que esta se mantenha competitiva, entre outros fatores, é que motivam estudos de pesquisa como este no sentido de auxiliar a empresa no atendimento de seus objetivos, garantindo sua sobrevivência. Neste sentido, a importância do estudo do problema de layout apresenta dois aspectos:

Aspecto econômico. Sabe-se que anualmente parte significativa dos departamentos construídos é modificada, requerendo novo planejamento, exigindo da empresa a escolha de um layout viável e eficiente. Para que esta possa obter considerável redução nos custos de produção, é necessário repensar o layout. Desta forma, uma indústria que pretenda ser competitiva e eficiente, deve estar constantemente reorganizando o seu layout fabril devido, principalmente, à evolução tecnológica que produz novas máquinas e equipamentos, tornando o parque de máquinas velho e obsoleto. O espaço que se torna vago pelo rearranjo mais eficiente dos departamentos, pode por si só constituir-se em fonte de imensos benefícios econômicos. Na maioria das empresas, a melhor utilização do espaço redundando em muitos outros importantes e recorrentes benefícios de produtividade. Técnicas concebidas para

melhorar a utilização do espaço eliminam o excesso de estoques em processo e os correspondentes investimentos para mantê-los. A redução permanente de estoques diminui os custos financeiros. Além disso, departamentos mais intimamente relacionados, minimizam o movimento desnecessário de pessoal, maquinário e matéria-prima, produzindo importantes resultados econômicos.

Aspecto científico. O problema de layout é um problema de otimização combinatória de difícil solução para problemas reais, pois estes geralmente envolvem um grande número de restrições. Devido à grande dificuldade de se resolver analiticamente um problema que reflete a realidade, ou seja, que existe na prática, muitos pesquisadores têm se concentrado no desenvolvimento de novas técnicas para tratar o problema do layout.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O resultado esperado deste estudo, de forma geral, é a redução de custos, associada ao manejo de materiais dentro de um sistema de manufatura realista, bem como o aumento da produtividade, obtido a partir de uma boa disposição física dos departamentos no chão de fábrica. Visando minimizar o custo de movimentação de materiais entre os diversos departamentos que compõem um sistema industrial realista, considerou-se um conjunto de restrições que englobam ocupação e disponibilidade de área.

Restrições de localização do departamento:

- Posição fixa de departamentos.
- Departamentos não podem se sobrepor.
- Departamentos são necessariamente adjacentes.
- Departamentos são necessariamente não adjacentes.

Restrições de disponibilidade de área:

- Área total disponível, bem como o seu formato.
- Quantidade específica de área necessária para cada departamento.
- Restrições geométricas individuais dos departamentos.

- Considerou-se que o espaço (a fábrica) destinado ao layout é retangular e de tamanho fixo conhecido a priori, e que os departamentos que compõem o layout também são retangulares, podendo ou não haver variação de área e formato dentro de intervalos pré-estabelecidos, isto é, limitados por razões de aspecto.

1.3.2 Objetivos específicos

Para o desenvolvimento da proposta descrita no objetivo geral, tornou-se necessário atingir alguns objetivos mais específicos, descritos a seguir:

- Conhecer as principais características de um sistema de manufatura.
- Estudar o problema do layout industrial, suas tendências e perspectivas.
- Examinar as abordagens aplicadas ao problema do layout industrial.
- Aplicar a metaheurística busca tabu ao problema do layout considerando um conjunto mais abrangente de restrições.
- Aplicar os algoritmos por nós desenvolvidos em problemas de *Benchmark*, reportados na literatura, comparando os resultados obtidos.
- Analisar e validar os resultados obtidos.

1.4 Contribuição

Como contribuição, apresenta-se uma ferramenta computacional para a geração de layouts viáveis e eficientes capaz de tratar problemas sujeito a um conjunto de restrições realistas que serão apresentadas um pouco mais adiante. A fim de se gerar soluções que englobem tais restrições, fez-se uso da metaheurística busca tabu com algumas adaptações para o tratamento do problema.

Sendo assim e conhecendo o pré-requisito fundamental para a permanência da competitividade, alta qualidade do produto, alta produtividade, baixos custos de produção, tudo isto aliado ao aprendizado de técnicas de trabalho inovadoras, é que temas de pesquisa como este contribuem com os diversos sistemas produtivos, uma vez que procuram respostas para seus problemas.

1.5 Organização da dissertação

Neste capítulo fizemos uma breve introdução sobre o problema do layout industrial, a motivação que nos leva a prosseguir com este estudo, bem como uma descrição rápida dos nossos objetivos.

O restante deste trabalho está dividido da seguinte forma: No capítulo 2 apresentamos uma breve descrição do sistema fabril, bem como o problema de layout em sistemas de manufatura. No capítulo 3 apresentamos uma breve revisão da bibliografia consultada, mostrando alguns dos conceitos, métodos e heurísticas descritas atualmente na literatura referentes ao problema estudado. No capítulo 4 encontra-se a contextualização do problema de layout, definindo o escopo do problema por nós estudado. Descrevemos ainda neste capítulo o conjunto de restrições tratadas, abrangendo características geométricas e de localização, conceito de distância e função objetivo usados em nosso estudo. No capítulo 5 apresentam-se os fundamentos da metaheurística busca tabu como abordagem utilizada, bem como as adaptações que se fizeram necessárias para a sua utilização no desenvolvimento deste trabalho. O capítulo 6 enfoca a metodologia de análise do problema utilizada e sua respectiva aplicação no problema estudado a fim de validarmos os resultados obtidos. No capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos para o conjunto de problemas, bem como o desempenho do algoritmo e as discussões sobre a validação dos resultados. No capítulo 8 apresentam-se as conclusões finais sobre este trabalho, além de algumas propostas de trabalhos futuros que poderão ser realizados a partir deste estudo. Os detalhes de todos os testes executados no AVOLI encontram-se nos anexos A, B e C, assim como os dados de entrada para todos os problemas tratados, bem como, os layouts finais das melhores soluções encontradas. No anexo D uma introdução rápida ao ambiente AVOLI é apresentada.

Capítulo 2

O problema de layout em sistemas de manufatura

A palavra manufatura derivada do Latim (*manus* = mão, *factus* = fabricado), é utilizada para descrever a fabricação de bens pelas mãos ou especialmente por máquinas, principalmente quando a fabricação é realizada em larga escala e com divisão de trabalho.

Com a abertura do mercado e a globalização, grandes transformações vêm ocorrendo nas empresas. Atualmente, a redução dos custos de fabricação, o aumento da qualidade dos produtos e um contínuo crescimento da produtividade são fundamentais para as empresas atingirem seus objetivos. Nos últimos anos o sistema de manufatura vem recebendo considerável atenção no que diz respeito à funcionalidade tanto operacional quanto técnica e neste contexto, é imprescindível descobrir como o layout pode influenciar nos custos de fabricação e nos índices de produtividade das empresas.

O layout define e integra os elementos produtivos, ou seja, é a maneira como homens, máquinas e equipamentos estão dispostos numa fábrica. Poderíamos definir layout como sendo a organização das instalações físicas de uma companhia para promover o uso eficiente dos equipamentos, materiais, pessoas e energia. Para atender a estes objetivos torna-se necessário à elaboração de um layout funcional que contemple em seu projeto formas de minimizar os custos de produção, otimizar a qualidade intrínseca do que se produz sob este layout, bem como, promover o uso efetivo das pessoas, equipamentos, espaço e energia, proporcionando ao empregado, conveniência, segurança e conforto. Um layout funcional deve permitir a gestão dos custos de projeto, sejam eles atribuídos a novas instalações ou pela

modificação/atualização das instalações atuais, bem como permitir que metas e prazos finais de produção sejam atingidos [HAL88], [HAR91], [SLA97] e [GUR00].

2.1.1 Diagramas de fluxo

O diagrama de fluxo é a representação gráfica que mostra o caminho viajado por cada parte desde o recebimento e estoque, até o momento da expedição. Em sua análise devemos considerar os seguintes tópicos [HAL88], [HAR91] e [GUR00]:

Há fluxo cruzado?

Sua existência pode resultar em congestionamentos e perigos de segurança. Podem ser minimizados ou até mesmo eliminados pela adaptação e/ou aquisição de novos equipamentos, serviços, ou pela criação/eliminação de departamentos.

Há regressos (contrafluxos)?

Comprovadamente, tais custos poderão atingir até três vezes o custo do fluxo correto. Apenas um contrafluxo pode prejudicar o andamento de vários fluxos diretos. Sendo assim, os contrafluxos podem e devem ser eliminados pelo posicionamento mais adequado do departamento. Algumas vezes isso até poderá significar o desmembramento do departamento em novos departamentos.

Existem transportes excessivos?

A distância viajada pelas partes custa dinheiro na medida em que aumenta o tempo de fabricação. Devemos considerar ainda que a manipulação excessiva de material pode degradar a qualidade do produto final por exigir maior quantidade de mão-de-obra.

2.1.2 Análise do fluxo de produção

A análise do fluxo de produção provê informações críticas ao projetista do layout, inclusive exigências de operação, necessidades de manipulação de materiais, necessidades de armazenamento, entre outras.

Com estas informações, o projetista do layout é desafiado a eliminar tantos passos quanto possíveis, combinar passos, idealizar estações de trabalho, eliminar contrafluxos e fluxos cruzados, reduzir a distância viajada, reduzir o custo de fabricação, melhorar a qualidade intrínseca e aumentar a segurança no trabalho [HAL88], [HAR91] e [GUR00].

2.2 Tipos de layout

Um layout pode assumir vários tipos de disposições físicas, sendo dependente exclusivamente do tipo de atividade econômica desempenhada em cada empresa. Desta forma, teremos diferentes tipos de relacionamentos entre departamentos, dependendo da natureza da atividade desenvolvida. Esta disposição irá influenciar diretamente o tráfego entre os departamentos. Os principais tipos de layout industrial são [HAL88], [HAR91], [ASK93], [SLA97] e [GUR00]:

- Layout de produto estático.
- Layout orientado ao produto.
- Layout orientado à família de produto.
- Layout orientado ao processo.

2.2.1 Layout de produto estático

O layout de produto estático é aplicado quando o produto a ser fabricado é consideravelmente grande ou pesado. Neste caso, o produto deve ser processado ou montado em local fixo determinado previamente. As máquinas, equipamentos ou pessoas é que se deslocarão ao redor deste produto, conforme seja necessário. Este tipo de layout é encontrado freqüentemente em fabricantes de turbinas hidroelétricas, aviões, grandes transformadores de tensão, navios, entre outros. A fabricação de tais produtos é controlada pelo projeto e a posição do maquinário muda de acordo com a evolução do projeto [ASK93].

2.2.2 Layout orientado ao produto

O layout orientado ao produto (também conhecido por linha de produção) é utilizado quando um único produto ou um determinado grupo de produtos semelhantes são produzidos em grande volume. Máquinas/Postos de operação são posicionados em uma linha de produção/montagem. A seqüência dos equipamentos obedece à seqüência das operações às quais os produtos estarão submetidos (ver figura 2.1). A determinação deste tipo de layout está freqüentemente relacionada com a obtenção da melhor combinação de tarefas/atividades a serem executadas em cada posto operativo. O problema apresentado por este tipo de disposição física, reside em balancear a linha de produção.

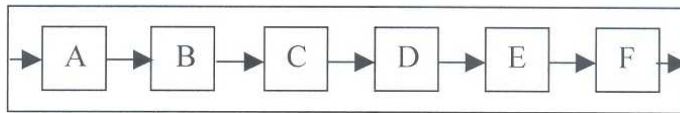


Figura 2.1 Planta com layout por linha de produção [ASK93].

Tipos de fluxo padrão

Na elaboração do layout industrial, é colocada freqüentemente ênfase no fluxo de material entre departamentos. O fluxo de material requer manipulação, o que gera custos e não agrega valor ao produto. Dependendo da aplicação e espaço disponível as máquinas podem ser colocadas em um dos padrões mostrados na figura 2.2

O padrão de fluxo em "U" é freqüentemente usado quando for necessário manter o abastecimento e a descarga da linha de produção no mesmo espaço físico. Isto pode se dar devido a considerações de manipulação de material (a mesma empilhadeira pode ser usada para ambos os propósitos) ou considerações de acesso externas (acesso de estrada, docas de caminhão). Também são preferidos fluxos em "U" para esteiras de produção. Neste caso, os trabalhadores são colocados no centro do "U" e podem monitorar um ao outro no progresso do trabalho, colaborando facilmente, sempre que exigido. A proximidade íntima também ajuda no espírito de equipe.

Fluxos em "O" são comumente usados em células de máquina que são abastecidas por um único robô de manipulação de material. Planos serpentinos são usados para processos de montagem longos que precisem se ajustar em áreas quadradas [ASK93].

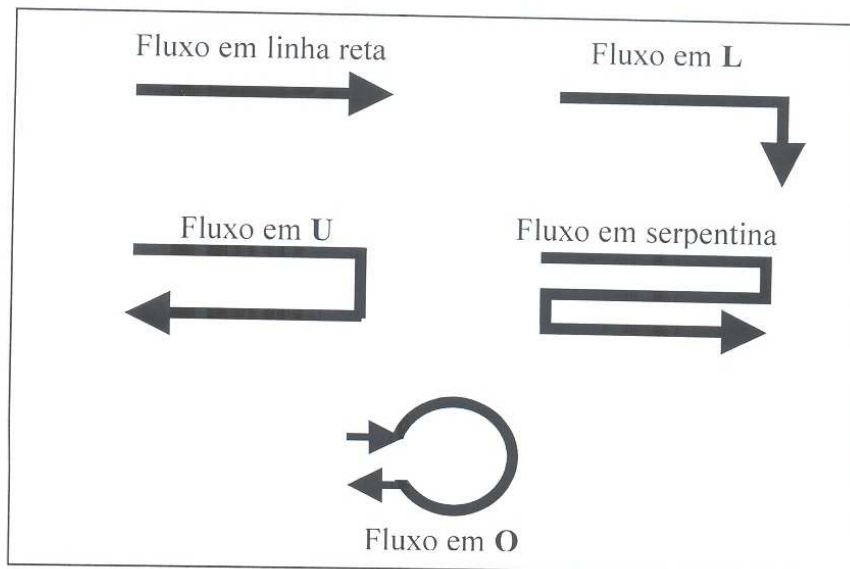


Figura 2.2 Padrões de fluxo de material - linha de produção [ASK93].

2.2.3 Layout orientado à família de produto

O layout orientado à família de produto, também conhecido por layout celular, é aplicável quando uma família de componentes será processada por uma pequena célula de fabricação. Neste arranjo, um encadeamento de máquinas e equipamentos forma a célula. Cada célula possui seu próprio sistema de manuseio de materiais, tipicamente um robô ou sistema de transporte. Se ainda possível, a parte em questão é completamente processada em apenas uma célula (ver figura 2.3). Os diversos componentes oriundos das respectivas células serão então direcionados para as áreas de montagem [ASK93].

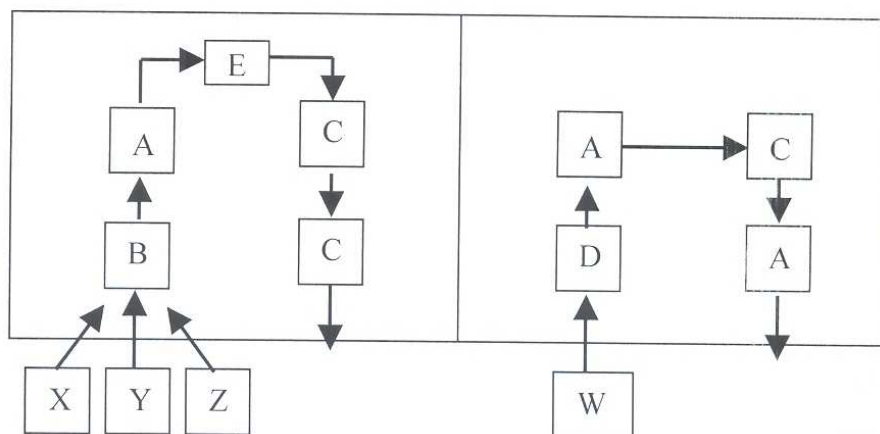


Figura 2.3 Planta com layout por família de produto [ASK93].

Legenda: A, B, C, D e E (tipos de máquinas) - X, Y, Z e W (peças)

2.2.4 Layout orientado ao processo

Os problemas propostos e tratados neste trabalho são comuns ao tipo de layout orientado ao processo. Este tipo de layout possui grande flexibilidade, sendo utilizado predominantemente quando a tecnologia de execução tem caráter predominante sobre os outros fatores de produção. Assim, o layout orientado ao processo agrupa máquinas que executam atividades semelhantes em um único departamento, de modo a realizar operações análogas em um departamento específico. O material move-se através de seções especializadas [ASK93].

Assim, em uma planta com layout por processo, pode-se encontrar um setor de torneamento, um setor de furadeiras, um setor de plainas, um setor de retifica, área de prensas, área de injeção, área de solda, área de pintura, área de fornos, e assim por diante. Pode não haver uma sequência de operações. Exemplo na figura 2.4.

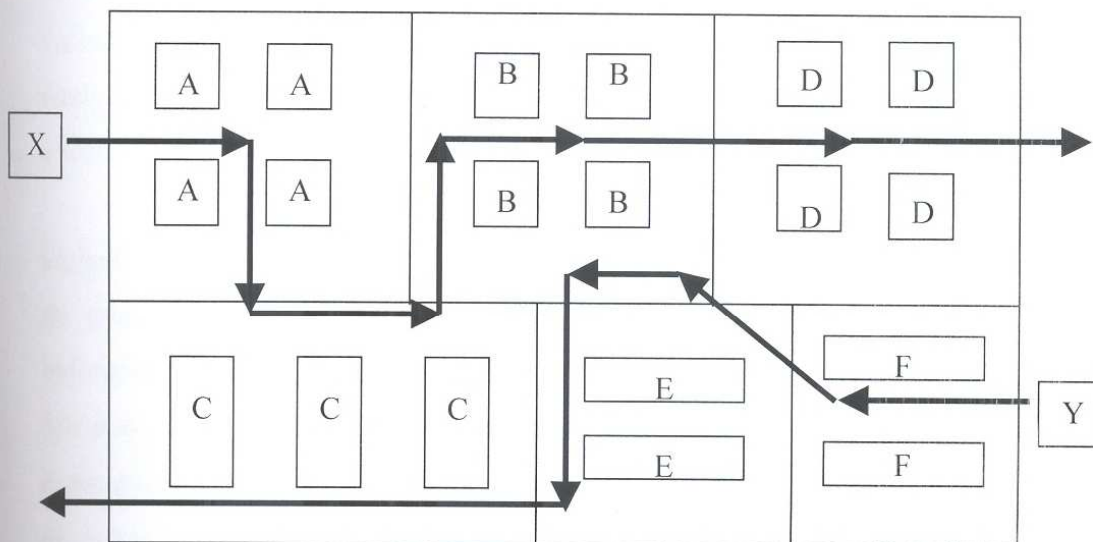


Figura 2.4 Planta com layout por processo [ASK93].

Legenda: A, B, C, D, E e F (tipos de máquinas)

X e Y (peças - caminho único para cada parte)

Tais layouts são corriqueiros em indústrias mais antigas e em "job-shops". Este tipo de layout requer o manuseio de grande quantidade de material enquanto as partes, submetidas a diversas operações, se movem entre os departamentos, permitindo que os operários e supervisores se especializem em processos específicos. No layout orientado ao processo

produz-se uma grande variedade de produtos com baixa quantidade de itens por modelo de produto produzido.

Usa-se layout orientado ao processo quando:

- As máquinas forem de difícil movimentação.
- Houver grande variedade de produtos.
- Houver grandes variações nos tempos requeridos para diferentes operações.
- Houver demanda pequena ou intermitente.

Características do layout orientado ao processo

O layout orientado ao processo apresenta as seguintes características: fabricação de vários tipos de produtos; é muito flexível na variação da demanda; freqüente utilização da mesma máquina para duas ou mais operações; produção relativamente baixa de cada variedade; muitas inspeções requeridas durante a seqüência de operações; alta proporção de equipamentos que requeiram instalações especiais; máquinas executam operações diversas ajustando-se ao tipo de demanda.

Como vantagens do layout orientado ao processo tem-se: grande flexibilidade com a variação do produto; adaptabilidade a produtos de grande variação sazonal; melhor controle de processos complicados ou precisos; possibilidade de utilizar prêmios de produção individuais para os operários; flexibilidade quanto às mudanças na seqüência das operações relativas a um processo; departamento de supervisão, pois cada seção pode ter um chefe especializado; a continuidade pode ser mantida quando alguma máquina eventualmente parar de operar.

Desvantagens do layout orientado ao processo

Grande manuseio de materiais e maior quantidade de material em processamento.

A tabela 2.1 mostra as características gerais para os tipos de layouts mencionados. Cada sistema pode ser representado como uma combinação do volume de produção versus a variedade de produtos produzida em cada ambiente. O layout apropriado para as combinações do volume da demanda e a variedade de produtos pode ser visualizado na figura 2.5 [ASK93].

Tabela 2.1 Características gerais para os tipos de layouts [ASK93].

CARACTERÍSTICAS	PRODUTO ESTÁTICO	LINHA DE PRODUÇÃO	FAMÍLIA DE PRODUTO	PROCESSO
Tempo de processamento	Baixo	Alto	Baixo	Médio
Trabalho em curso	Baixo	Alto	Baixo	Médio
Nível de conhecimento	Depende	Alto	Médio-alto	Depende
Flexibilidade de produtos	Baixo	Alto	Médio-alto	Alto
Flexibilidade de demanda	Médio	Alto	Médio	Alto
Utilização das máquinas	Alto	Médio-baixo	Médio-alto	Médio
Utilização do empregado	Alto	Alto	Alto	Médio
Custo unitário de produção	Baixo	Alto	Baixo	Alto

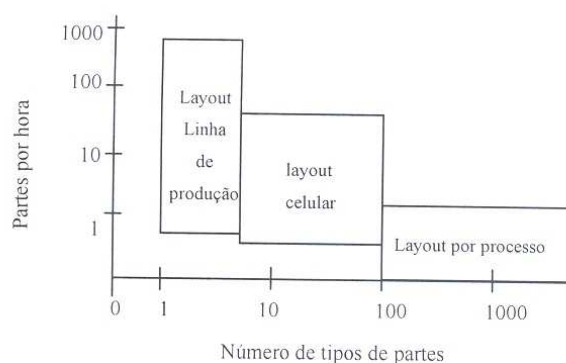


Figura 2.5 Volume versus variedade [ASK93].

2.3 Considerações sobre o capítulo

Pode-se concluir que o tipo da disposição física do layout irá influenciar diretamente o tráfego entre os departamentos. Para calcular layouts alternativos, uma medida de tráfego precisa ser estabelecida. O tráfego pode ser especificado de forma quantitativa ou qualitativa. Medidas quantitativas podem incluir peças por hora, movimentos por dia, etc. Medidas qualitativas dizem respeito a aspectos subjetivos, tais como questões de ergonomia, satisfação do empregado em trabalhar num centro de trabalho específico, entre outras. As medidas quantitativas e qualitativas, quando possível, devem ser consideradas em conjunto.

No próximo capítulo apresenta-se uma breve revisão bibliográfica, evidenciando alguns dos conceitos, métodos e heurísticas descritas atualmente na literatura referentes ao tratamento do problema proposto.

Capítulo 3

Revisão bibliográfica

“...heurísticas são critérios ou métodos computacionais para decidir o caminho mais eficiente entre várias alternativas de ação, buscando encontrar um determinado objetivo, porém não necessitam encontrar o melhor caminho entre todas as alternativas possíveis [MUL97]”.

A vantagem no uso de heurísticas está no fato de que elas aumentam a eficiência do processo de busca no espaço de soluções, retornando uma boa solução (que muitas vezes é a ótima), em detrimento da exploração de todas as alternativas. Uma motivação para seu uso é que a solução ótima do problema raramente é requerida e as heurísticas raramente apresentam desempenho de pior caso (pior desempenho possível para uma dada instância).

A seguir faremos uma breve introdução apresentando alguns algoritmos descritos na literatura que são empregados para a obtenção de soluções do problema estudado.

3.1 Introdução

Nos últimos anos, produziu-se um número considerável de trabalhos científicos relacionados ao planejamento do layout de fábrica. Os primeiros trabalhos datam do final da década de 50. Entre os trabalhos pioneiros, destacam-se [KOO57], [ARM63], [VOL66] e [MON93]. O foco principal destes trabalhos era otimizar a localização relativa dos departamentos/recursos sobre um único pavimento, formulando o problema do layout de fábrica como sendo um problema de atribuição quadrática (do inglês *Quadratic Assignment Problem* QAP).

Inicialmente ignoraram-se restrições comumente encontradas em um sistema de manufatura realista, tais como: a quantidade necessária de área alocada a um departamento

específico, bem como o seu aspecto (formato), etc. Sendo assim, os trabalhos produzidos nas décadas de 60, 70 e meados de 80, não consideravam layouts realistas devido à complexidade existente em tais sistemas. Layouts realistas podem conter vários departamentos, e estes, sujeitos a um número grande de restrições.

Determinar a disposição física de um conjunto de máquinas e/ou departamentos, considerando um conjunto de restrições às quais estão submetidos, é geralmente definido como sendo um problema de layout, o qual tem sido modelado usando-se diferentes abordagens, destacando-se entre elas: a teoria de grafos, o MIP e a abordagem hierárquica, usando estrutura de árvore binária, que é a mais recente delas.

3.2 “Quadratic Assignment Problem” - QAP

O QAP é um problema NP-Completo [GAR79], implicando que, em geral, é um problema de difícil solução. Usando o QAP podemos encontrar soluções ótimas para casos gerais do problema do layout de fábrica. O QAP serve para gerar um layout onde as áreas destinadas às máquinas e/ou departamentos são iguais em formato, sendo sempre retangulares.

[KOO57] introduziram o problema de atribuição quadrática (QAP) para modelar o problema de alocar e interagir plantas de áreas iguais (formatos iguais). O QAP foi aplicado a um conjunto de problemas que incluem planejamento urbano, layout de painéis de controle e design de rede elétrica [BAZ75]. A formulação QAP nomeia toda máquina e/ou departamento para alguma localização dentro da construção e no máximo uma máquina e/ou departamento para cada localização. O custo de alocação à uma particular localização da construção é dependente da localização dos departamentos que estão interagindo no sistema, isto é, para se conseguir um custo menor, é necessário dispor cada máquina e/ou departamento de maneira otimizada.

O QAP pode ser interpretado da seguinte maneira: suponhamos que m departamentos precisam ser atribuídos a n localizações e que cada uma delas possui uma quantidade de espaço que será ocupado pelo departamento atribuído a ela. Para representar a interação entre os departamentos, um peso (tráfego) positivo é associado a cada par de departamentos. Assim, o problema consiste em atribuir cada departamento a uma localização diferente de todos os outros de tal forma que a soma dos pesos vezes as distâncias entre todos os departamentos seja a menor possível (em problemas de minimização). Podemos concluir que para cada

localização j está designado um único departamento i , da mesma forma, cada departamento i é atribuído a uma única localização j .

Quando existir mais localizações que departamentos, é requerida a introdução de departamentos abstratos para a adequada formulação do problema. Quando departamentos exigirem diferentes quantidades de espaço, estes poderão ser divididos em sub-departamentos, com cada sub-parte necessitando apenas de uma quantidade padrão de espaço. Para que os sub-departamentos possam permanecer juntos (pois as sub-partes formam o departamento), são criados fluxos artificiais com altos valores de tráfego entre estes, forçando-os a permanecer unidos. Entre as abordagens usadas para tratar o problema do layout de departamento, o QAP tem sido a mais popular de todas [CHI01]. As limitações que o QAP apresenta para problemas realistas têm motivado pesquisadores a se concentrarem e a desenvolverem outras abordagens que englobem um conjunto maior de restrições encontradas num ambiente fabril realista.

3.3 Teoria de Grafos

Na abordagem da teoria de grafos é assumido que a localização desejável de cada par de departamentos adjacentes seja conhecida previamente [FOU78]. Inicialmente, o aspecto físico e a quantidade de área exigida pelo departamento são ignorados e cada departamento é então representado por um nó no grafo. As relações de adjacências serão representadas por arcos conectando dois nós (departamento) adjacentes no grafo.

3.4 “Mixed Integer Program” - MIP

O Problema de layout também pode ser modelado como um problema de programação inteira mista (MIP) [MON90] e [MON93]. Um caso especializado deste modelo foi desenvolvido por [HER91], onde são especificadas largura, comprimento e a orientação do departamento. No MIP, a primeira solução obtida para o layout de fábrica, geralmente é referida como um layout em “Bloco”, o qual mostra os contornos que satisfazem os requerimentos de área e aspecto de cada departamento.

Um layout em bloco geralmente não especifica os corredores ou o arranjo dos objetos dentro de cada departamento e, em um layout em bloco, os departamentos que compõem o bloco não podem ser divididos em duas ou mais partes.

3.5 “Hierarchical Approach” - Árvore Binária

Esta forma de modelar o problema é recente e foi apresentada por [TAM91], e posteriormente usada por [FUR97] e [AZA00]. O problema de layout foi modelado usando-se a estrutura de árvore binária de forma a permitir ampliar as restrições e tornar o problema mais próximo da realidade. Nesta formulação, inicialmente é produzida uma árvore binária baseada no tráfego entre os departamentos, de forma que departamentos com alto tráfego entre si fiquem próximos na árvore. A partir da árvore binária é possível se construir um layout, inicialmente obtendo-se as dimensões da região onde os departamentos serão colocados e, em seguida, realizando-se o processo de particionamento desta região. A árvore binária é percorrida recursivamente a partir da raiz e as áreas correspondentes são identificadas na região de particionamento.

Como exemplo, suponha que já se dispõe da árvore de particionamento, conforme mostra a figura 3.1; O processo de particionamento da região a ser particionada dá-se da seguinte forma: Começando-se pela raiz (nó -5), calcula-se o somatório das áreas dos departamentos que estão no ramo esquerdo (ou direito, tanto faz; neste exemplo, começamos pelo ramo da esquerda, isto é, as áreas dos nós 1, 2 e 3). O valor obtido é usado na região de particionamento, onde se varre a região até se obter a área correspondente a este somatório. Faz-se então, o particionamento, e em seguida continua-se a percorrer a árvore binária seguindo-se para o nó -4 e novamente a área do ramo esquerdo (nó 1) é calculada e traduzida na região de particionamento. Uma vez realizado este particionamento, a região particionada é então identificada (neste caso, o departamento 1). O processo de percorrer a árvore binária é recursivo e continua até que toda ela seja percorrida, correspondendo ao final do processo a um layout na região de particionamento, conforme figura 3.2.

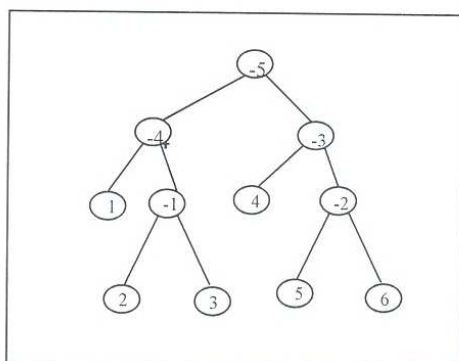


Figura 3.1 Árvore binária de particionamento [TAM91].

1	4
2	5
3	6

Figura 3.2 Layout gerado na região de particionamento [TAM91].

É especialmente importante observar que, ao tentar particionar a região que representará o layout final, algumas vezes torna-se necessário decidir se o particionamento ocorrerá na vertical ou se na horizontal. Não existe estudo conclusivo que envolva esta decisão, porém, uma boa opção utilizada até o momento se restringe a verificar a distância entre os limites inferior e superior para o corte vertical e horizontal no local considerado naquele instante a ser cortado [TAM91] e [FUR97]. Se a distância vertical for maior que a distância horizontal, realiza-se então, um corte na horizontal, caso contrário, realiza-se um corte na vertical.

3.6 Algoritmos para o problema de layout

Vários algoritmos foram desenvolvidos na tentativa de se obter soluções ótimas para o problema de layout. Os primeiros algoritmos desenvolvidos tentavam obter soluções ótimas, principalmente através de algoritmos “*branch-and-bound*”. O algoritmo *branch-and-bound* não consegue obter soluções ótimas para problemas de grandes dimensões, fazendo com que o tempo e a quantidade de memória necessária para obtenção das soluções viáveis sejam muito grandes. Assim, as pesquisas passaram a se concentrar na busca de soluções sub-ótimas através de métodos heurísticos. Estes métodos heurísticos podem ser divididos em: algoritmos construtivos; algoritmos de melhoramento; algoritmos híbridos; algoritmos baseados na teoria de grafos [TAM98].

3.6.1 Algoritmos para obtenção de solução ótima

A maioria das modelagens apresentadas para o problema de layout são baseadas na formulação do QAP. [BAZ79] procuraram resolver o problema de programação quadrática usando o algoritmo “*branch-and-bound*”. Os algoritmos para obtenção de soluções ótimas apresentam algumas desvantagens tais como a necessidade de grande capacidade de memória,

tempo computacional para obtenção da solução e sua utilização efetiva apenas em problemas de pequena dimensão.

3.6.2 Algoritmos para obtenção de soluções sub-ótimas

Devido às desvantagens apresentadas anteriormente, as pesquisas passaram a se concentrar em heurísticas para a obtenção de soluções sub-ótimas a fim de resolver o problema de layout de departamentos.

Algoritmos construtivos

Nos algoritmos construtivos, os departamentos são atribuídos a uma determinada localização, um de cada vez, até que um layout completo seja obtido. Os principais algoritmos construtivos são:

CORELAP

O CORELAP - “*COmputerized RElationship Layout Planning*” [LEE67], começa construindo um layout calculando a média total de proximidade de cada departamento em relação aos demais, onde a média total de proximidade é a soma dos valores numéricos (*valores diferentes e especificados pelo usuário*) atribuídos aos relacionamentos (exemplo: do tipo $A=6$, $E=5$, $I=4$, $O=3$, $U=2$ e do tipo $X=1$, valores diferentes) entre o departamento e todos os outros departamentos que compõe o sistema. O departamento, tendo a maior média total de proximidade, é então atribuído ao centro da região de layout.

Empates poderão ocorrer na verificação da maior média total de proximidade. Se isto ocorrer, o departamento com a maior área é usado. Dando seqüência ao processo, a tabela de relacionamento é percorrida e se algum departamento tendo relacionamento A com o departamento selecionado é encontrado, este é também atribuído ao layout. Porém, pode não existir departamento algum mantendo relacionamento A com o departamento selecionado. Se não existir, a tabela de relacionamento é novamente percorrida a procura de um relacionamento E, em seguida I, e assim por diante.

Caso dois ou mais departamentos sejam encontrados mantendo o mesmo relacionamento com o departamento selecionado, o departamento tendo a maior média total de proximidade é selecionado. O terceiro departamento a compor o layout é determinado percorrendo-se novamente a tabela de relacionamento para ver se existe um departamento

ainda não atribuído que possuía relacionamento A com o primeiro departamento selecionado. Se existir, este departamento é atribuído ao layout. Se existir empate, a média total de proximidade é usada conforme descrito anteriormente.

Se não existe nenhum departamento com relacionamento A com o segundo departamento, o procedimento é repetido considerando relacionamento E, então I, e assim por diante.

O mesmo procedimento é repetido para o quarto departamento, exceto pelo fato de que os três primeiros departamentos que já foram atribuídos ao layout não entram mais na busca. Desta forma, o procedimento continua até que todos os departamentos sejam selecionados a compor o layout.

ALDEP

O ALDEP - “*Automated Layout DEsign Program*” [SEE67] possui os mesmos dados básicos de entrada e objetivos como CORELAP. A diferença básica entre CORELAP e ALDEP é que o CORELAP resolve empates usando a média total de proximidade, enquanto que o ALDEP resolve empates aleatoriamente. A diferença filosófica básica entre CORELAP e ALDEP é que CORELAP procura produzir um único melhor layout, enquanto ALDEP produz muitos layouts e deixa ao projetista escolher o melhor.

Conforme mencionado anteriormente, o primeiro departamento selecionado por ALDEP para compor o layout é selecionado aleatoriamente. A tabela de relacionamento é então percorrida para determinar se existe um departamento com relacionamento A com o departamento selecionado aleatoriamente. Se existe um departamento, ele é selecionado a compor o layout. Se existir mais de um departamento, um deles é selecionado aleatoriamente. Se não existir nenhum departamento com um grau mínimo de relacionamento especificado pelo usuário, o segundo departamento a compor o layout será escolhido também aleatoriamente. Uma vez que o segundo departamento já tenha sido selecionado, o procedimento de seleção continuará até que todos os departamentos tenham sido selecionados para compor o layout.

O ALDEP inicia a seqüência de particionamento, atribuindo o primeiro departamento no lado esquerdo da região de particionamento. Cada novo departamento atribuído ao layout será disposto à direita do último departamento atribuído a região do layout.

Após todos os departamentos já terem sido selecionados e atribuídos ao layout, o algoritmo ALDEP avalia a qualidade do layout atribuindo valores aos relacionamentos entre departamentos adjacentes. Se um departamento for adjacente a outro departamento com um relacionamento do tipo A, o valor 64 é atribuído à medida da qualidade. Um relacionamento do tipo E adiciona 16, um relacionamento do tipo I adiciona 4, um relacionamento do tipo O adiciona 1 à qualidade do layout; um relacionamento do tipo U não adiciona nada e, se dois departamentos estão adjacentes possuindo um relacionamento do tipo X, então o valor -1024 é adicionado à qualidade do layout.

Toda vez que o ALDEP é executado, ele pode gerar até 20 diferentes layouts, que são apresentados mostrando a qualidade dos layouts gerados, conforme avaliação comentada anteriormente.

Algoritmos de melhoramento

Os algoritmos de melhoramento necessitam de uma solução inicial a partir da qual inicia-se o processo de melhoria através da permutação das posições dos departamentos, buscando-se melhorar a solução inicial. O mais conhecido algoritmo de melhoramento será descrito a seguir.

CRAFT

O CRAFT - “*Computerized Relative Allocation of Facilities Technique*” [ARM63] foi a primeira técnica computacional a procurar resolver o problema de layout. A técnica procura desenvolver um layout que minimize o custo de transporte, onde o custo de transporte é dado pelo produto dos tráfegos, das distâncias e dos custos unitários das distâncias. O CRAFT inicia determinando os centróides dos departamentos no layout inicial. Então é calculada a distância retangular entre os centróides dos departamentos e estas distâncias são armazenadas numa matriz de distâncias, onde, em seguida, o CRAFT avalia permutações de departamentos com áreas iguais ou que tenham uma borda comum. Os seguintes tipos de permutações podem ser considerados: permutação de pares de departamentos; permutação de três departamentos; permutação de um par, seguida por permutação de três departamentos; permutação de três departamentos, seguida da permutação de um par ou o melhor entre a permutação de um par ou três departamentos.

A permutação de departamentos que oferecer a maior redução do custo de transporte será realizada. O CRAFT continua considerando a permutação de departamentos para o novo layout. O procedimento continua até que nenhuma permutação encontrada reduza o custo de transporte. A busca então termina.

Uma desvantagem deste algoritmo é que o resultado final é inteiramente dependente da solução inicial, assim, é necessário executar o procedimento diversas vezes para a obtenção de resultados satisfatórios. Além de *CRAFT*, existem outros algoritmos de melhoramento [HER87].

Os softwares existentes, tanto os construtivos quanto os de melhoramento (*CRAFT*, *CORELAP*, *ALDEP*, *MAT*, *PLANET*, *COFAD*, etc.), atuam fundamentalmente com o objetivo de minimizar o custo de manipulação de materiais e/ou maximizar a proximidade dos departamentos, sendo os resultados fornecidos por eles, uma representação das posições relativas dos diversos departamentos no chão de fábrica representado por um diagrama de blocos.

Numa linha mais moderna, existe o software *FACTORY* [CIM89]. Este software atua conjuntamente com o *AUTOCAD* [COR94] representando um avanço em relação às ferramentas anteriormente desenvolvidas, principalmente por explorar os recursos da computação gráfica e a grande capacidade de interagir com o projetista.

Algoritmos híbridos

Scriabin e Vergin [SCR85] propuseram um algoritmo chamado de *FLAC* (Facility Layout by Analysis of Clusters) que consiste em três estágios. No primeiro estágio, os departamentos são alocados de tal forma que as distâncias entre si sejam inversamente proporcionais aos tráfegos. No segundo estágio, os departamentos são alocados usando o princípio do estágio 1, mas restrições de área são consideradas. O terceiro estágio consiste em ajuste fino, usando um algoritmo de permutação.

Elshafei propôs um algoritmo que é a combinação de um algoritmo construtivo e outro de melhoramento [ELS77]. O algoritmo construtivo emprega duas estratégias. Na primeira estratégia, localizações são ordenadas em ordem ascendente de R_j , onde R_j é a soma das distâncias da localização j para todas as outras localizações. Departamentos também são ordenados em ordem ascendente de L_i , onde L_i é baseada no número de departamentos tendo

tráfego com departamento i e a soma destes tráfegos. Usando a primeira estratégia a qualquer estágio das atribuições, o departamento ainda não atribuído com o maior L_i é alocado para a localização ainda não usada com mínimo R_j . Na segunda estratégia, a qualquer estágio k , o departamento não alocado e que tenha o maior tráfego com o departamento alocado no estágio $k-1$, é atribuído a uma localização não usada, que cause o mínimo incremento no custo total. Usando as duas estratégias, é obtido um layout completo e melhorado (se possível) através de permutações.

3.7 Simulações

Para superar essas questões surge a simulação de sistemas, uma opção interessante para tratar situações complexas envolvendo disposições de departamentos, análises dos fluxos de produção, ergonomia e segurança do trabalho. A simulação assumiu nos anos 80, uma posição de destaque na área de pesquisa operacional, ressurgindo como uma poderosa ferramenta de apoio à tomada de decisão em sistemas complexos de produção. Isso se deve muito ao avanço proporcionado pelos chamados "ambientes de simulação". Ao contrário das tradicionais linguagens de simulação, que exigiam muita experiência e dedicação do usuário, esses novos ambientes são extremamente amigáveis, consistentes em termos estatísticos e possuem interfaces gráficas que permitem visualizações das simulações. Os softwares mais conhecidos nessa área são: *ARENA* [SYS99], *ALTOMOD* [AUT93] e *PROMODEL* [PRO90].

Na área de projetos gráficos existem também excelentes softwares como o *AUTOCAD* [COR94], *MICROSTATION* [MIC94] e *3D STUDIO*. Mas não existem sistemas computacionais que combinem as características individuais destes softwares, de forma amigável. Além disso, não existe uma metodologia apropriada que absorva o potencial destas ferramentas para o projeto de layout industrial.

Conclui-se que a maioria dos softwares mencionados acima gera apenas uma representação em blocos do layout, sendo soluções aproximadas, exigindo redesenho e modificações por parte do projetista, provocando um distanciamento da solução ótima encontrada. A atuação dessas ferramentas ocorre somente nos primeiros passos do processo do projeto de layout industriais não contribuindo nas etapas de detalhamento e implantação.

No próximo capítulo serão apresentados o escopo do problema abordado e o conjunto de restrições que será considerado neste trabalho.

Capítulo 4

Escopo do problema abordado

O problema de layout pertence à classe de problemas de alocação espacial, tendo sido estudado em vários contextos, incluindo o planejamento do espaço arquitetônico, layout de células de manufatura, layout de escritório, etc. Dependendo do tipo de departamento que será colocado no layout podemos ter várias aplicações em cada contexto. A formulação do problema já foi largamente definida. Em geral, a área de cada departamento bem como o custo de interconexão entre todos os pares de departamento é estimado a partir de dados coletados por engenheiros de produção. O custo de interconexão também pode ser especificado quantitativamente através de um peso atribuído ao fluxo de material ou pode ser medido qualitativamente através de requerimentos de adjacência. O objetivo é minimizar o custo total de interconexão entre os departamentos enquanto todas as restrições especificadas sejam satisfeitas (ex. departamentos não podem se sobrepor no mesmo pavimento).

A dificuldade de se resolver o problema do layout se origina no fato de que a localização de cada departamento depende das localizações dos demais. Em adição, a complexidade do problema aumenta à medida que outras restrições são acrescentadas a descrição do problema, pois estas precisam ser respeitadas [TAM91]. Considerou-se neste trabalho restrições que englobam ocupação e disponibilidade de área, onde o espaço (a fábrica) destinado ao layout é retangular e de tamanho fixo, conhecido a "*priori*". O tipo de layout que estamos tratando aqui é o chamado de "layout por processo", onde consideramos que todos os departamentos são retangulares possuindo mais precisamente as seguintes restrições:

4.1 Restrições geométricas

Existem importantes características geométricas associadas aos departamentos, sendo que a maioria delas estão relacionadas a departamentos retangulares. Em relação ao problema tratado, consideraram-se aqui as seguintes restrições:

1. **Formatos (aspectos) dos departamentos.** Usualmente os departamentos são modelados como sendo blocos retangulares ou quadrados. Um bloco retangular é talvez a representação mais simplificada de um departamento. Um bloco quadrado é um caso especial de um retângulo, requerendo menos variáveis para ser modelado [TAM91]. Nos trabalhos de [TAM92], [FUR97] e [TAM98], os departamentos também são definidos com formatos retangulares e limitados por razão de aspecto, tendo muitas vezes o seu aspecto violado. *Considerou-se que todos os departamentos possuem formatos retangulares e que seus formatos não são violados por razão de aspecto.*
2. **Área do departamento.** Ao se projetar um layout, os departamentos podem apresentar diferentes exigências quanto à área, dependendo da aplicação e objetivo do layout proposto. Ao contrário dos problemas tratados como problema QAP onde os departamentos são todos considerados iguais em área e formato, em casos realistas departamentos podem exigir áreas e formatos desiguais. *Considerou-se que os departamentos são diferentes em área e formato, devendo ser arranjados no interior do espaço destinado ao layout, ou seja, todos os departamentos devem ser alocados dentro do quadro externo dado.*
3. **Percentual de redução de área do departamento.** Em sua definição, a área do bloco que representará o departamento poderá sofrer variação em sua área para permitir ajustes de atribuição a uma particular localização. A esta variação, chamamos de *Percentual de Redução de área do departamento*. Por exemplo, considere que um departamento em sua definição necessite de 100 m^2 , e ao se atribuir este departamento a uma determinada localização, constata-se que só se dispõe de 95 m^2 . Neste caso, se o departamento na sua definição permitir uma margem de variação para menos (exemplo 10%), ele poderá perfeitamente ser atribuído àquela particular localização. Quando o inverso ocorrer, não representará nenhum problema, visto que a quantidade mínima de área exigida pelo departamento foi respeitada. *Considerou-se que a área dos departamentos pode sofrer*

variação para menos dentro de um intervalo que vai de zero até o máximo limite de redução permitido. O limite máximo de redução é dado.

4. **Orientação do departamento.** Em geral um departamento poderá ser colocado na área destinada ao layout da fábrica com orientação vertical (**V**) ou com orientação horizontal (**H**). Se um departamento puder ser colocado tanto na vertical quanto na horizontal, dizemos que possui orientação livre, caso contrário, dizemos que o departamento possui orientação fixa. Nos trabalhos de [TAM92], [FUR97] e [TAM98], estas situações não são consideradas. *Aqui, tanto orientação livre quanto orientação fixa foram consideradas.*
5. **Razão de aspecto do departamento.** Para departamento de formato retangular, a razão de aspecto a_i é definida com sendo a razão dada pelo comprimento do departamento dividido por sua largura. Departamentos com razões de aspecto variável permitem maior flexibilidade em seu formato. Se o departamento permite variação em sua razão de aspecto, dizemos que este departamento é flexível, caso contrário, dizemos que este departamento é rígido. Nos trabalhos de [TAM92], [FUR97] e [TAM98], a razão de aspecto é variável, podendo ser violadas. *Foram considerados aqui as duas possibilidades (departamentos flexíveis e rígidos) e não se permitiu que os departamentos tivessem sua razão de aspecto violada.* Cada departamento é representado como um bloco retangular, onde sua razão de aspecto é definida por [TAM91]:

$$a_i = \frac{\text{Comprimento do Departamento } i}{\text{Largura do Departamento } i} = \frac{C_i}{L_i}$$

6. **Departamentos fixos ou móveis.** Um departamento fixo terá sua localização conhecida à priori sendo somente atribuído a uma localização previamente escolhida dentro do layout. Sendo móvel, o departamento poderá ocupar qualquer posição que não esteja ocupada. *Consideraram-se as duas situações. Atribuiu-se ao layout primeiramente os departamentos do tipo fixos quando estes existiam e em seguida, os móveis, respeitando as restrições impostas.*
7. **Áreas inutilizadas no interior da construção (área morta).** É comum no interior da fábrica se encontrar regiões proibidas de serem utilizadas. Normalmente estas áreas são ocupadas por pilares, escadas, elevadores, equipamentos e áreas de segurança, entre outras (ver figura 4.1). A existência destas áreas irá distorcer a forma retangular da área usável

do departamento i . Necessita-se de uma medida que represente o grau de distorção desta área. A razão de área morta β_i do departamento i é introduzida com este propósito, podendo ser definida como sendo a área do espaço ocupado dentro do departamento i dividida pela área do departamento i . *Considerou-se a existência de áreas inutilizadas no interior da fábrica e que os departamentos não serão violados por estas áreas.*

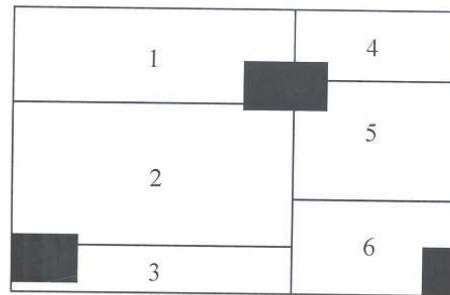


Figura 4.1 Layout com espaços ocupados [TAM91].

4.2 Restrições de localização

Existem diferentes situações que podem ocorrer em casos realistas. Por exemplo: em um ambiente industrial de um único piso, os *departamentos não podem se sobrepor*, e em muitos casos práticos, temos a situação onde *departamentos são necessariamente adjacentes*, isto é, precisam ficar próximos um do outro, devido a dependência que existe entre eles para que seus objetivos possam ser concretizados (ser adjacentes significa que alguns departamentos devem manter uma borda comum). Em outras situações, *departamentos são necessariamente não adjacentes*, pois estes de alguma forma precisam ficar afastados. Um exemplo bastante razoável seria, colocarmos o departamento de pintura afastado por alguma medida de comprimento do departamento de solda, não permitindo que estes fiquem muito próximos tentando assim evitar acidentes. (ser não adjacentes significa que alguns departamentos não devem manter borda comum). *Consideraram-se as três situações, ou seja, departamentos não podem se sobrepor, departamentos são necessariamente adjacentes, departamentos são necessariamente não adjacentes.*

4.3 Distância

Um fator muito importante na formulação de problemas que envolvem layouts é o conceito de distância entre dois departamentos.

As duas formas mais usuais de mensurarmos a distância entre dois pontos são: distância retangular (movimento ao longo da direção horizontal e vertical) e distância euclidiana (movimento em linha reta entre dois pontos) [TAM91] e [ASK93]. Se fixarmos o departamento i na localização $P_i = (x_i, y_i)$ e o departamento j na localização $P_j = (x_j, y_j)$, podemos definir a distância retangular e euclidiana entre os departamentos i e j por:

A distância retangular entre os pontos P_i e P_j é dado por:

$$d_{ij}^R = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad \text{Equação 4.1}$$

A distância euclidiana entre os pontos P_i e P_j é dado por:

$$d_{ij}^E = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad \text{Equação 4.2}$$

No caso de layout de departamentos, a distância centro-a-centro (euclidiana ou retangular) é usada para estimar a distância esperada entre dois departamentos, quando os pontos de entrada e saída dos departamentos não são conhecidos [TAM91] e [FUR97]. O número e a localização dos pontos de entrada e saída, assim como o tráfego associado a cada ponto de entrada e/ou saída, são ditados principalmente pelos detalhes do layout, os quais são tipicamente desenvolvidos após o layout final ser obtido. *Usou-se na formulação distância retangular centro-a-centro.*

4.4 Função objetivo

O custo de interconexão pode ser especificado quantitativamente através de um peso f atribuído ao fluxo de material e a distância d entre os centros dos departamentos.

O objetivo é minimizar o custo total de interconexão entre os departamentos fixos e móveis respeitando todas as restrições especificadas dado por:

$$\text{Min}_{s \in S} F = \sum_i^n \sum_j^n f_{ij} d_{ij} * M^{(k+l+m)}$$

Equação 4.3

$$i, j = 1, 2, \dots, n$$

Onde:

f_{ij} = custo do fluxo entre o departamento i e o departamento j , por unidade de distância

d_{ij} = distância retangular centro-a-centro entre o departamento i e o departamento j .

k = Número de departamentos não posicionados no *layout*.

l = Número de departamentos que violaram adjacência (perto).

m = Número de departamentos que violaram adjacência (longe).

M = Big M. Valor positivo e grande, definido em função do problema de modo que k , l e m sejam iguais a zero.

n = Soma dos departamentos fixos mais a soma dos departamentos móveis.

As restrições de razão de aspecto e de área morta são definidas respectivamente por

$$a_{i(\min)} \leq a_i \leq a_{i(\max)} \text{ e } 0 \leq \beta_i \leq \beta_{i(\max)},$$

Onde:

a_i = Razão de aspecto do departamento i .

$a_{i(\min)}$ = Razão de aspecto mínima do departamento i .

$a_{i(\max)}$ = Razão de aspecto máxima do departamento i .

β_i = Razão de área morta do departamento i .

$\beta_{i(\max)}$ = Razão de área morta máxima do departamento i.

A tabela 4.1 mostra um quadro comparativo das restrições tratadas neste trabalho (cujo modelo denomina-se AVOLI – Ambiente Visual para Otimização de *Layout* Industrial) com as restrições tratadas nos trabalhos de [TAM91], [TAM92], [FUR97], [TAM98] e [CHI01].

Tabela 4.1 Comparativo de restrições.

RESTRIÇÕES	[TAM91]	[TAM92]	[FUR97]	[TAM98]	[CHI01]	AVOLI
Quadro externo		X	X	X	X	X
Sobreposição	X	X	X	X	X	X
Adjacência						X
Não adjacência						X
Áreas desiguais	X	X	X	X	X	X
Razão de aspecto	X	X	X	X		X
Razão de área morta		X	X			X
Razão de redução						X
Orientação (V/H)	X					X
Departamentos Móveis	X	X	X	X	X	X
Departamentos Fixos	X					X
Áreas ocupadas		X	X			X
Tamanho do maior problema	30	30	30	20	40	55

Pode-se observar pela tabela 4.1, que este trabalho trata um conjunto maior de restrições que os anteriores. O grande diferencial é que em alguns problemas todas as restrições foram consideradas de uma só vez (exemplo problema com 55 departamentos). Outro aspecto relevante, diz respeito ao maior porte dos problemas considerados neste trabalho. O maior problema considerado por [CHI01] é igual a 40 departamentos, onde se considera um conjunto composto por quatro restrições, ao passo que neste trabalho, considera-se um número maior de departamentos (55 departamentos) sujeitos a um conjunto maior de restrições.

4.5 Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo demonstrou-se que as características geométricas associadas aos departamentos, assim como todas as outras restrições presentes em um ambiente industrial realista, caracterizam a complexidade do problema. Desta forma se faz necessário tratar o problema de layout levando-se em conta as suas características mais importantes.

Para o tratamento destas restrições, o capítulo seguinte apresenta os fundamentos da metaheurística busca tabu como abordagem utilizada, bem como, as adaptações que se fizeram necessárias para a sua utilização no desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 5

Abordagem utilizada

Com o intuito de se melhorar o resultado da solução inicial encontrada, utilizou-se busca tabu (BT) como estratégia de refinamento. Para se chegar aos resultados obtidos, iniciou-se gerando uma solução de partida, construída a partir de dados básicos e, em seguida a solução encontrada foi melhorada. Assim, o problema é solucionado em 2 passos: No primeiro, é gerada uma solução inicial baseada em heurística construtiva, e no segundo é utilizada busca tabu. São analisadas variantes da implementação da busca tabu (estruturas de vizinhança e tamanhos da lista tabu).

A seguir são descritos os princípios básicos da BT, bem como as adaptações necessárias para a sua aplicação no refinamento da solução inicialmente encontrada.

5.1 Busca tabu

A busca tabu é um método heurístico aplicado, com muito sucesso, a um grande número de problemas de otimização combinatória. A metaheurística busca tabu foi proposta inicialmente por [GLO89a], [GLO89b] e [HAN86] para resolução de problemas de otimização. Está baseada em princípios de solução inteligente de problemas. A metaheurística busca tabu, teve origem a partir de uma solução de Glover para problemas de programação inteira. A busca tabu foi projetada para encontrar boas aproximações para a solução ótima de qualquer problema de otimização, possuindo habilidade de guiar o processo de busca de métodos iterativos de melhoria. Neste contexto, a busca tabu fornece meios de explorar o espaço de soluções com maior profundidade, de forma a alcançar pontos mais distantes dentro do espaço de busca.

Definição:

A busca tabu é um procedimento adaptativo que pode guiar um algoritmo de busca local na exploração contínua do espaço de busca, sem ser encerrado prematuramente pela ausência de vizinhos que melhorem a solução corrente.

Caso ocorram retornos a um ótimo local previamente visitado (condição desejada, mas não necessária), a busca tabu, através de seus mecanismos de controle, permitirá que a exploração do espaço de soluções prossiga, evitando ciclagem. O processo no qual a busca tabu transcende a otimalidade local se baseia em uma função de avaliação, que escolhe, a cada iteração, o movimento com o maior valor de avaliação.

Os passos genéricos de um processo de busca tabu são:

1. Escolher uma solução inicial S .
2. Enquanto um critério de terminação não for satisfeito, avalie a lista de candidatos a movimento. Selecionar a melhor solução admissível, S_{melhor} (onde: S_{melhor} é a melhor solução entre todas $S' \in V(S)$: S' não pertencendo à lista tabu), ou que satisfaça algum critério de aspiração.
3. Atualizar a solução corrente $S \leftarrow S_{\text{melhor}}$, e também atualizar a lista tabu.
4. Se o critério de parada foi satisfeito, parar retornando o melhor resultado, caso contrário voltar ao Passo 2.

A função de avaliação escolhe o movimento que produz a maior melhoria, ou a menor piora na função objetivo. O melhor movimento admissível num dado instante é aquele com maior avaliação na vizinhança da solução corrente em termos de valor de função objetivo e restrições tabu. A fim de guardar informações dos movimentos realizados ou apenas para proibir que este ou aquele movimento de troca seja realizado por um certo número de iterações, uma lista de elementos tabu é gerada. A lista tabu vai garantir que futuros movimentos que apresentam característica tabu, sejam proibidos de serem executados, permitindo que o algoritmo prossiga, saindo de uma possível situação de ciclagem. A aceitação de movimentos que não melhorem a solução atual, abre a possibilidade de retorno a soluções já visitadas, portanto ciclos poderão ocorrer, porém, estes não representarão problema, pois a função da lista tabu é exatamente evitar que tais ciclos ocorram. Deste modo,

é necessário restringir a busca através de uma estratégia de proibição cuja função seja controlar e atualizar a lista tabu. O objetivo da estratégia de proibição é evitar que seqüências de soluções sejam repetidas, induzindo a exploração de novas regiões.

A busca tabu utiliza estruturas flexíveis de memória para armazenar o conhecimento sobre o espaço de busca adquirido durante o processo de exploração do espaço de soluções, contrariamente a algoritmos que não utilizam memória (e.g. *simulated annealing*) ou que utilizam estruturas rígidas de memória (e.g. *branch-and-bound*).

A busca tabu está centrada em três princípios básicos:

- Uso de uma estrutura de dados do tipo fila para guardar o histórico da evolução do processo de busca.
- Uso de um mecanismo de controle para fazer o balanceamento entre a aceitação, ou não, de uma nova configuração, com base nas informações registradas na “fila tabu” representando o conjunto de restrições e o critério de aspiração desejado.
- Incorporação de procedimentos que alternam as estratégias de diversificação e intensificação.

A metaheurística busca tabu faz uma exploração agressiva, fazendo sempre o melhor movimento possível em qualquer instante, podendo melhorar ou não a solução atual, o que permite alternar os processos de diversificação e intensificação através da análise dos atributos proibidos que estão guardados em uma lista tabu [GLO97].

Na ***diversificação***, o objetivo é direcionar a busca para novas regiões, de forma a atingir todo o espaço de busca evitando assim que a busca pare numa determinada solução ótima local que corresponde a repetições cíclicas indesejadas. A idéia é tentar explorar regiões ainda inexploradas ou pouco exploradas modificando as regras de escolha, com o intuito de desencorajar movimentos e soluções muito freqüentes no decorrer da história da busca (penalizações) e incentivar movimentos e soluções pouco freqüentes no decorrer da história da busca (penalizações), ou ainda reiniciar a busca utilizando as informações de freqüência.

Na ***intensificação***, o objetivo é reforçar a busca em regiões onde parece ter maiores chances de apresentar soluções de qualidade, ou seja, intensificar a busca na vizinhança de uma solução historicamente considerada boa. Deve-se modificar as regras de escolha de

forma a encorajar movimentos e soluções com características “boas” no decorrer da história da busca, combinar movimentos com a estrutura dessas soluções ou reiniciar a busca a partir de uma solução “boa”.

5.2 Visão do geral do sistema

Para entender como o sistema AVOLI está organizado, observe a figura 5.1. Ela representa a visão geral do macro sistema, onde de posse dos dados básicos de entrada e com as configurações necessárias para o teste em questão, uma solução inicial é gerada para posterior refinamento utilizando um dos métodos de otimização disponíveis. Em seguida os resultados encontrados são apresentados na forma textual e gráfica.

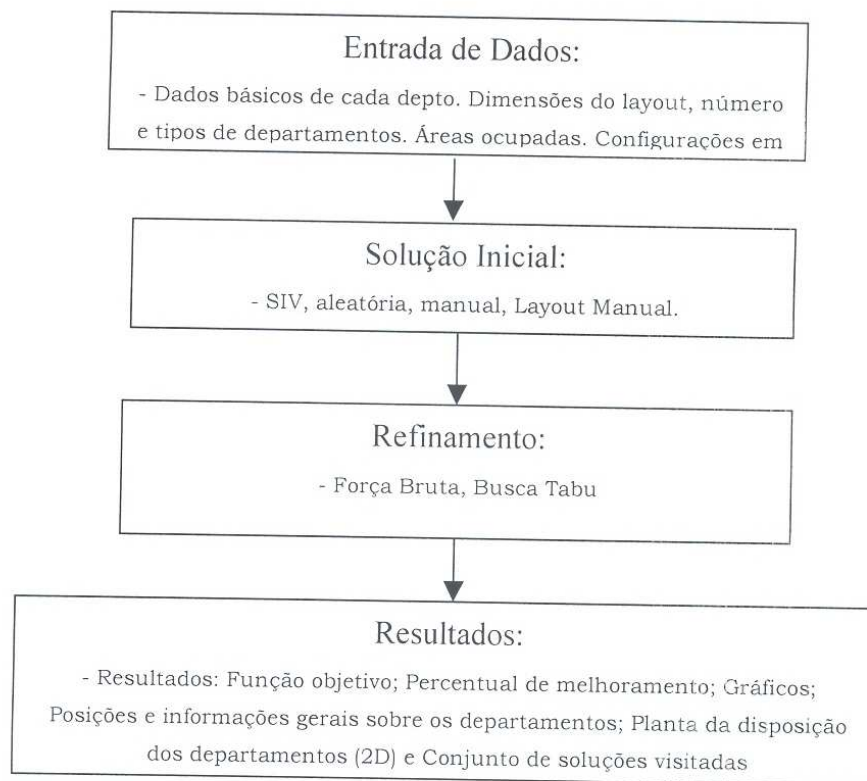


Figura 5.1 Fluxograma – Visão geral do sistema.

O processo se inicia com o fornecimento dos dados básicos de cada departamento e das dimensões do quadro externo, sendo que esta última pode também ser sugerida pelo sistema, por meio do procedimento ATN apresentado na figura 5.2.

O layout é obtido por meio de 4 algoritmos principais, em 2 passos. O primeiro passo é a geração de uma solução inicial viável. Para isso, se utiliza os procedimentos SIV e VCM. Partindo desta solução viável, o segundo passo é a aplicação de busca tabu (BT) para o refinamento da solução inicialmente encontrada e a obtenção da solução final. Para isso, utiliza os procedimentos ABTA (Algoritmo Busca Tabu Adaptado), AMT (Algoritmo Matriz Tabu) e VCM (Algoritmo de alocação)¹.

5.3 Definição da área total disponível

A área do quadro externo da fábrica (Área Total Necessária – ATN) também pode ser sugerida pelo sistema. O algoritmo ATN é apresentado a seguir na figura 5.2. O ATN pode gerar automaticamente as dimensões do quadro externo se o projetista assim o desejar.

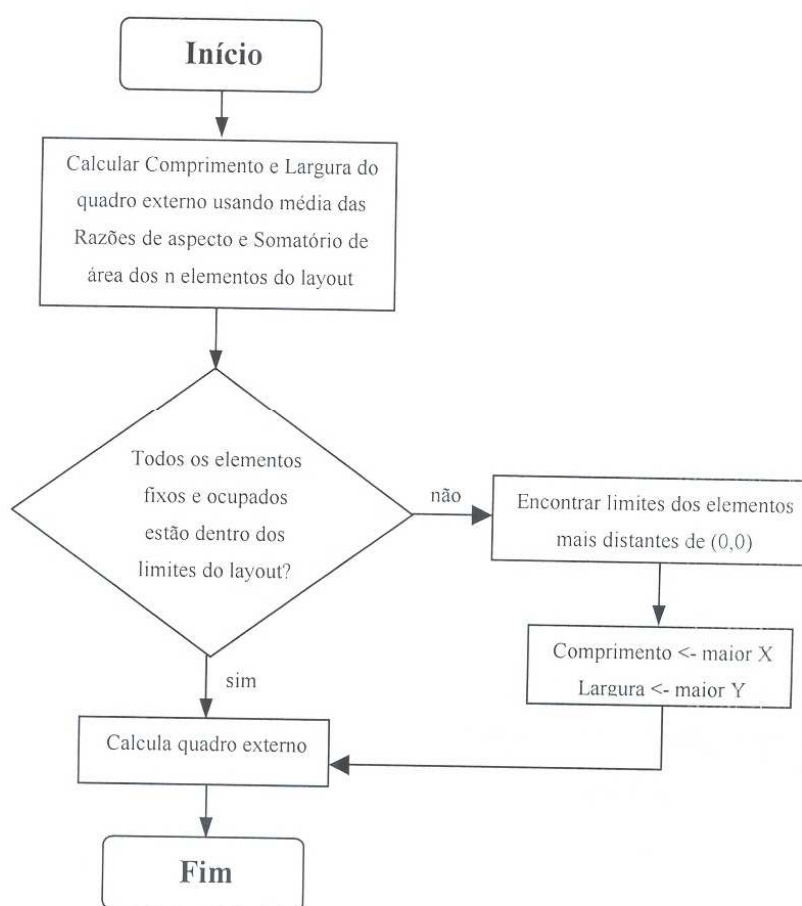


Figura 5.2 Fluxograma - Área do quadro externo gerada automaticamente.

¹ VCM – Nome dado ao algoritmo de alocação (VCM – Valdair Candido Martins).

5.4 Algoritmo de construção

Sistemas de layout auxiliados por computador baseados em métodos construtivos geram layouts a partir de dados básicos. Os departamentos são adicionados seqüencialmente sobre uma área plana até que todos tenham sido alocados.

5.4.1 Obtenção da Solução Inicial Viável (SIV)

O primeiro passo do algoritmo busca obter uma solução inicial viável para o problema. O algoritmo que gera a solução inicial viável (SIV) inicia construindo uma lista ordenada de departamentos móveis e fixos que por sua vez é a entrada para o algoritmo VCM, responsável por alocar cada departamento no espaço bidimensional fornecido. O algoritmo SIV escolhe portanto a ordem em que os departamentos devem ser alocados. Isto é feito da seguinte forma:

1. Constrói-se uma lista representando os departamentos. Na lista, primeiramente o maior departamento em área é atribuído, seguido daquele com quem mantém o maior relacionamento. Em seguida o próximo departamento a entrar na lista será aquele que mantiver o maior relacionamento com este último e assim sucessivamente. Caso o último departamento que entrou na lista não mantenha relacionamento com nenhum outro departamento, o próximo departamento a entrar na lista será o maior em área que ainda não entrou na lista. O processo continua até que todos os departamentos tenham sido colocados na lista.
2. Com a lista já construída, inicia-se o processo de alocação (algoritmo **VCM**). O primeiro departamento atribuído ao layout será o primeiro elemento da lista, o segundo departamento atribuído ao layout será o segundo elemento da lista e assim sucessivamente. O primeiro departamento é atribuído a partir da primeira posição livre da esquerda para a direita, de cima para baixo. O próximo departamento que será atribuído ao layout é o próximo elemento da lista, atribuído à direita do departamento anteriormente atribuído ao layout. Caso não seja possível esta atribuição, as próximas tentativas para se atribuir o departamento ao layout inicia-se pelo deslizamento do departamento à direita do último departamento já atribuído, caso não seja possível atribuí-lo à direita, tenta-se atribuí-lo abaixo, se ainda não for possível, tenta-se atribuí-lo à esquerda e se mesmo assim ainda não for possível, tenta-se atribuí-lo

acima, sempre deslizando o departamento de uma posição ao redor do último departamento atribuído ao layout.

3. Se o departamento não puder ser atribuído a uma localização adjacente ao departamento anterior respeitando todas as restrições, então este departamento será atribuído à próxima localização livre dentro do layout.
4. O processo continua até que todos os departamentos tenham sido atribuídos ao layout. Caso algum departamento não seja atribuído ao layout ou viole alguma restrição, a lista de alocação é refeita colocando-se o segundo maior departamento em área na segunda posição da lista e os demais elementos da lista de alocação são deslocados de uma posição para a direita e o processo é reiniciado.
5. Se em cada tentativa ocorrer alguma violação, o passo 4 se repete até que todas as n possibilidades tenham sido testadas ($n = ms + fs$, onde ms = total de departamentos móveis e fs = total de departamentos fixos).

Para os testes realizados, a solução inicial escolhida foi sempre uma solução viável, ou seja, ela não violou nenhuma das restrições impostas. A figura 5.3 apresenta o fluxograma para a geração de uma solução inicial viável (algoritmo SIV).

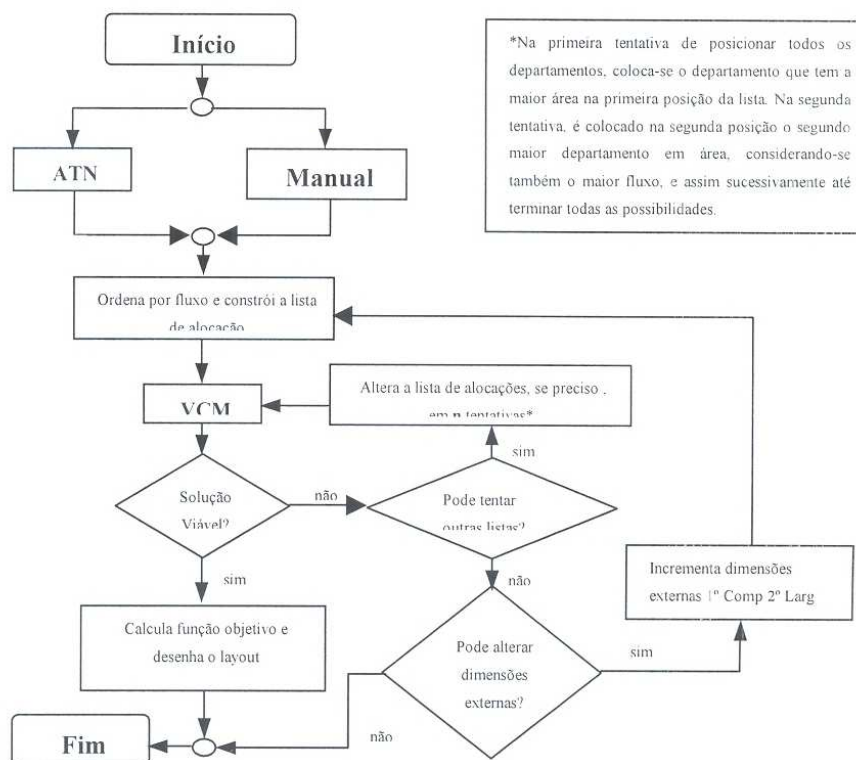


Figura 5.3 Fluxograma - Solução inicial.

5.5 Algoritmo de alocação

O algoritmo de alocação (**VCM**) é quem vai dispor fisicamente as áreas ocupadas, os departamentos móveis e os departamentos fixos dentro do quadro externo que representa a fábrica. Este algoritmo é o mais complexo de todos os algoritmos utilizados aqui. De posse da lista de alocação gerada manualmente, aleatoriamente ou pelo algoritmo **SIV**, começa posicionando todos os departamentos do tipo fixos no layout para em seguida posicionar os departamentos do tipo móveis. Este algoritmo faz a escolha do local apropriado para os departamentos fixos e móveis dentro do quadro externo proibindo que restrições de exigência de área de cada departamento, de adjacências (próximo e longe), de localização (nenhum departamento ou área ocupada podem ser colocados fora dos limites do quadro externo), de redução de área do departamento, de razão de aspecto do departamento, de sobreposição e de orientação dos departamentos (departamentos na horizontal ou na vertical) sejam violadas. A figura 5.4 apresenta o fluxograma do algoritmo **VCM**.

- ```

graph TD
 INICIO([INÍCIO]) --> A1[Aloca todos os departamentos Fixos no layout]
 A1 --> D1{1º Dep. da lista é Move?}
 D1 -- sim --> A2[Aloca o dep no 1º local vago do layout a partir de (0,0)]
 D1 -- não --> D2{Último dep. da lista?}
 D2 -- não --> C1((C))
 C1 --> A3[Escolhe o próximo dep. da lista]
 A3 --> D2
 D2 -- sim --> A4[Determina todas as adjacências dos departamentos]
 A4 --> D3{Ha violação de adjacências?}
 D3 -- não --> A5[Calcula F(x), desenha Layout]
 A5 --> FIM([FIM])
 D3 -- sim --> D4{Pode tentar corrigir ainda?}
 D4 -- não --> A5
 D4 -- sim --> A6[Tenta corrigir violação por adjacência e cria nova lista]
 A6 --> D2
 D2 --> D5{Proximo Dep é Move?}
 D5 -- não --> B1((B))
 B1 --> A6
 D5 -- sim --> A7[Aloca o próximo dep. da lista no layout ao lado* do dep. que está à esquerda na lista]
 A7 --> D6{Alocado?}
 D6 -- sim --> B2((B))
 B2 --> A6
 D6 -- não --> A8[Muda a razão de aspecto do dep. um passo]
 A8 --> D7{Pode mudar razão de aspecto?}
 D7 -- não --> A9[Diminui área do dep. um passo. Inicializa razão de aspecto.]
 A9 --> D8{Pode diminuir o dep.?}
 D8 -- não --> A10[Desloca dep. para a próxima posição válida inicializa razão e redução.]
 A10 --> D9{Pode deslozar o dep.?}
 D9 -- não --> D10((D))
 D9 -- sim --> A11[Reduz espaço entre os dep deslocando-os todos para cima e para esquerda (Domino)]
 A11 --> C2((C))
 C2 --> D10{Pode reduzir todos os dep.?}
 D10 -- não --> A12[Reduz todos os dep. em um passo]
 A12 --> A13((A))
 A13 --> D11{Pode diminuir o dep.?}
 D11 -- não --> A14[Muda a razão de aspecto do dep. um passo. Inicializa razão de aspecto.]
 A14 --> D12{Pode mudar razão de aspecto?}
 D12 -- não --> A15[Diminui área do dep. um passo. Inicializa razão de aspecto.]
 A15 --> D13{Pode diminuir o dep.?}
 D13 -- não --> A16[Desloca dep. para a próxima posição válida inicializa razão e redução.]
 A16 --> D14{Pode deslozar o dep.?}
 D14 -- não --> D10
 D14 -- sim --> A17[Reduz espaço entre os dep deslocando-os todos para cima e para esquerda (Domino)]
 A17 --> C2
 C2 --> D10
 D10 --> D15{Ainda existe outro espaço vazio?}
 D15 -- não --> A18[Posiciona o dep. neste espaço vazio no layout. Inicializa razão de aspecto e redução.]
 A18 --> D16{Pode diminuir o dep.?}
 D16 -- não --> A14
 D16 -- sim --> A19[Muda a razão de aspecto do dep. um passo. Inicializa razão de aspecto.]
 A19 --> D17{Pode mudar razão de aspecto?}
 D17 -- não --> A20[Diminui área do dep. um passo. Inicializa razão de aspecto.]
 A20 --> D18{Pode diminuir o dep.?}
 D18 -- não --> A21[Desloca dep. para a próxima posição válida inicializa razão e redução.]
 A21 --> D19{Pode deslozar o dep.?}
 D19 -- não --> D10
 D19 -- sim --> A22[Reduz espaço entre os dep deslocando-os todos para cima e para esquerda (Domino)]
 A22 --> C2
 C2 --> D10
 D10 --> D20{Alocado o dep. na próxima localização livre no layout}
 D20 --> A5

```

Figura 5.4 Fluxograma – Algoritmo de alocação VCM

## 5.6 Algoritmo de refinamento

Ao contrário dos métodos construtivos, os métodos de melhoramento começam com um layout inicial e tentam refiná-los através de sucessivas trocas entre as localizações dos departamentos. O algoritmo de busca tabu adaptado (**ABTA**) recebe uma solução inicial  $S_0$  e tenta durante um número pré estabelecido de iterações encontrar uma solução que apresente melhor qualidade, ou seja, que apresente a maior redução possível na função de avaliação. A figura 5.5 mostra o fluxograma para o refinamento de uma dada solução inicial. O gerenciamento da matriz tabu é realizado pelo algoritmo **AMT** conforme figura 5.6.

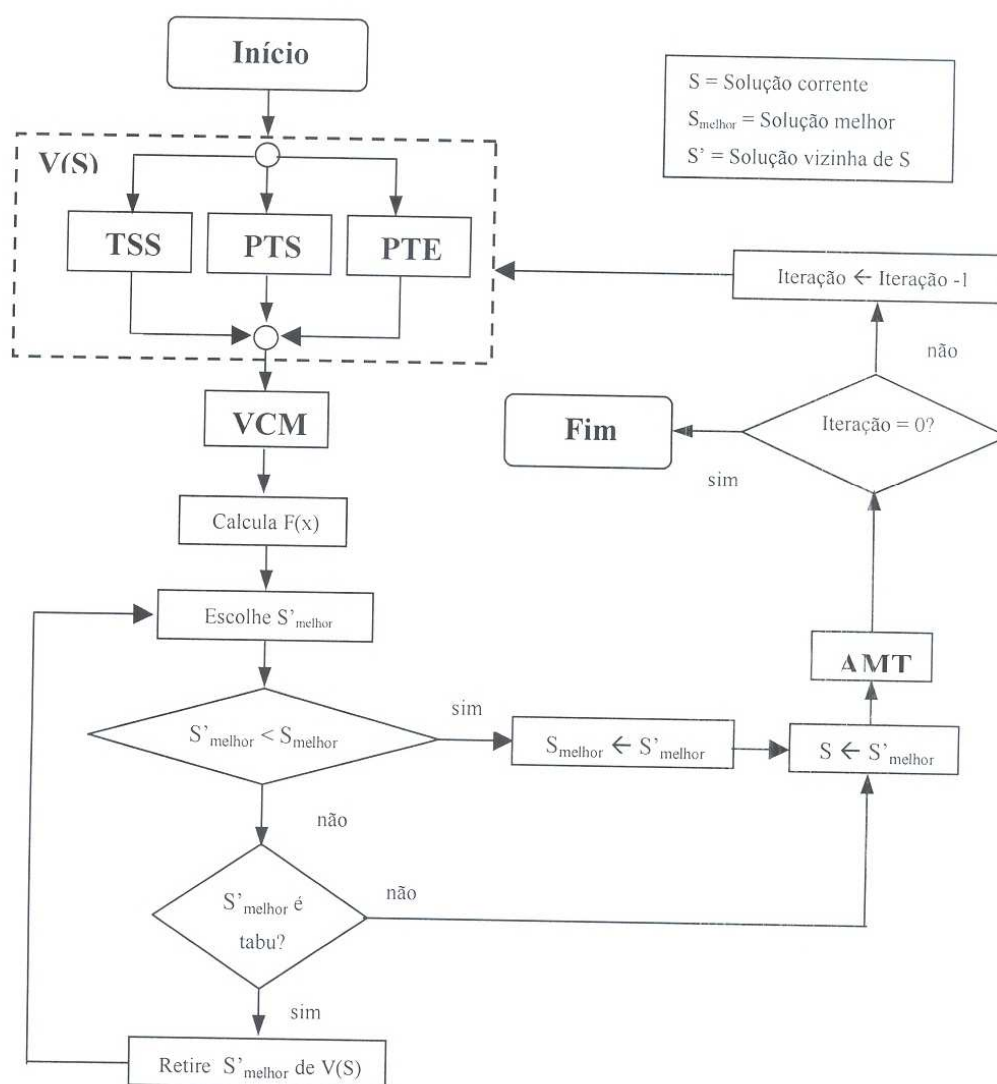


Figura 5.5 Fluxograma – Algoritmo ABTA.



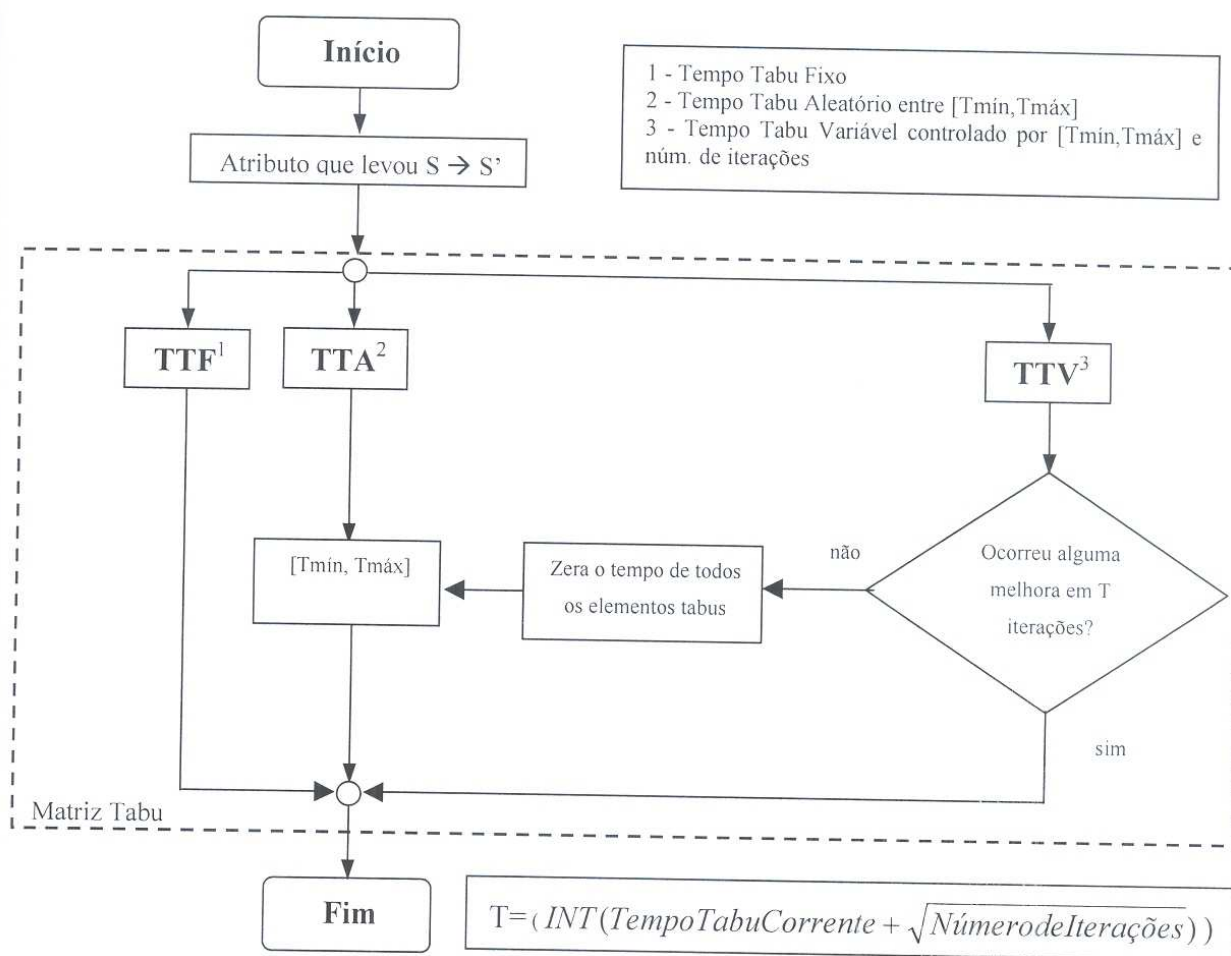


Figura 5.6 Fluxograma – Algoritmo AMT.

## 5.7 Elementos da busca tabu

Escolheu-se a estrutura de dados, o tipo de vizinhança adotada na heurística de busca, a representação da solução e a forma de verificação se certo movimento é tabu.

### 5.7.1 Representação da solução

A representação da solução é um vetor de elementos. Exemplo  $L(ABCDE)$ .

### 5.7.2 Tamanho da lista tabu adotada

A lista tabu armazena atributos dos movimentos que foram realizados. O tamanho da lista tabu reportado na literatura é geralmente de tamanho fixo e igual a 7. Para o QAP, o

tamanho da lista escolhida está geralmente entre  $(n/3)$  e  $(n/2)$  [CHI01], onde  $n$  é o tamanho do problema tratado. Em nosso trabalho realizamos testes utilizando lista estática (TTF – Tempo Tabu Fixo) considerando o tempo tabu como número fixo conforme sugerido na literatura e lista dinâmica (tamanho variável) com tempos tabus descobertos experimentalmente relacionados com o tamanho do problema e com a vizinhança adotada. A lista tabu dinâmica foi testada também com números sorteados aleatoriamente entre  $[T_{\min}, T_{\max}]$  ( $T_{\min}$  e  $T_{\max}$  escolhidos como números fixos).

*A lista dinâmica foi implementada de duas formas:*

**Lista aleatória (TTA – Tempo Tabu Aleatório):** A cada iteração um número aleatório é escolhido dentro do intervalo especificado por  $[T_{\min}, T_{\max}]$ , e é atribuído ao elemento tabu que acaba de entrar na lista.

**Lista variável (TTV - Tempo Tabu Variável):** Se não ocorrer nenhuma melhora na função objetivo no tempo de  $T$  iterações, a lista tabu é zerada e o seu tamanho é modificado para um valor escolhido dentro do intervalo especificado por  $[T_{\min}, T_{\max}]$ .  $T$  é dado por:

$$T = ( \text{INT}(\text{TempoTabuCorrente} + \sqrt{\text{Número de Iterações}}) )$$

Equação 5.1

### 5.7.3 Estrutura de vizinhança adotada

As estruturas de vizinhanças  $V(S)$  adotadas foram as seguintes: **TSS** (Trocas SimpleS), **PTS** (Pseudo Troca SimpleS) e **PTE** (Pseudo Troca Expandida). Estas estruturas serão descritas a seguir. Para ilustrar como estas estruturas de vizinhança funcionam, considere como exemplo a lista  $L$  formada pelos elementos  $A, B, C, D, E, F, G, H, I$  e  $J$ :

**TSS - Troca simples** (Número de vizinhos 10): Ex Troca  $A$  com  $B$ ,  $B$  com  $C$ ,  $C$  com  $D$ ,  $D$  com  $E$ ,  $E$  com  $F$ ,  $F$  com  $G$ ,  $G$  com  $H$ ,  $H$  com  $I$ ,  $I$  com  $J$  e  $J$  com  $A$ , escolhendo-se o melhor movimento admissível ou o movimento que satisfaça o critério de aspiração.

**PTS - Pseudo troca simples** (Número de vizinhos igual a 10): similar a troca simples, porém os movimentos não são efetivamente realizados, são apenas avaliados, sendo posteriormente escolhido para ser realizado o melhor deles. O melhor movimento que será efetivamente realizado é escolhido da seguinte forma: das  $U$  pseudo avaliações realizadas é escolhido um

subconjunto  $W \subseteq U$  para ser efetivamente testado. O melhor movimento admissível dentro deste subconjunto será realmente realizado.

Ser um movimento apenas avaliado significa que não é necessário utilizar o algoritmo VCM para a alocação efetiva dos departamentos dentro do quadro externo. A PTS considera que todos os departamentos são iguais em área, formato e aspecto, o que possibilita as pseudo trocas entre si. Como as relações de fluxos entre os departamentos não mudam, o que realmente pode alterar nos cálculos verdadeiros são as distâncias entre eles. A PTS então trabalha com as pseudo distâncias encontradas. Pode-se assim avaliar a pseudo vizinhança sem a necessidade de alocar os departamentos para se encontrar as distâncias verdadeiras. Aquele subconjunto de movimentos  $W$  que for mais promissor será verdadeiramente realizado, sendo finalmente escolhido o melhor deles para a geração da solução atual.

**PTE - Pseudo troca expandida:**  $V(S)$  é maior (Número de vizinhos 45). Número de vizinhos igual a  $n*(n-1)/2$ , similar a pseudo troca simples. Os movimentos são apenas avaliados, tomando-se uma parcela menor que  $n$  melhores pseudo-soluções para a sua realização efetiva. Após a realização efetiva destes pseudomelhores movimentos, a melhor solução gerada é aceita e escolhida como a melhor solução atual. O processo continua até que o número máximo de iterações seja atingido.

A tabela 5.1 mostra a estrutura da matriz tabu. É importante observar que o atributo (A,B), isto é, tanto o movimento de  $A$  para  $B$  quanto o movimento de  $B$  para  $A$  ficam proibidos de serem realizados durante um certo tempo tabu que vai sendo decrementado a cada iteração (tempo tabu escolhido: TTF ou TTA ou TTV). O sinal “+” antes dos números que identificam as linhas e colunas da matriz Tabu representa departamentos do tipo “móveis”.

Tabela 5.1 Estrutura da matriz tabu.

Tabela Tabu

|     | +1  | +2  | +3  | +4  | +5  | +6  | +7  | +8  | +9  | +10 | +11 | +12 | +13 | +14 | +15 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +1  | xxx | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |     |     |     |     | 0   |     |     |
| +2  | 0   | xxx | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 7   |     |     |     |     | 0   |     |     |
| +3  | 0   | 0   | xxx | 0   | 3   | 0   | 0   | 0   |     |     |     | 0   | 0   | 0   |     |
| +4  | 0   | 0   | 0   | xxx | 0   | 0   |     |     | 0   |     | 4   |     |     |     | 0   |
| +5  |     | 0   | 3   | 0   | xxx | 0   | 0   | 0   |     | 0   | 11  | 1   | 0   |     |     |
| +6  | 0   |     | 0   | 0   | xxx | xxx |     |     | 12  |     | 8   |     |     |     | 5   |
| +7  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | xxx | 0   | 6   |     | 0   | 0   |     |     |     |     |
| +8  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | xxx | 9   |     | 2   | 0   |     |     |     |     |
| +9  |     | 7   |     | 0   | 0   | 6   | 9   | xxx | xxx | 0   | 0   |     |     |     |     |
| +10 |     |     |     | 0   | 12  |     |     |     | xxx |     |     |     |     |     | 10  |
| +11 |     |     |     | 0   | 0   | 0   | 2   | 0   |     | xxx | 0   |     |     |     |     |
| +12 |     |     | 0   | 4   | 11  | 8   | 0   | 0   | 0   | 0   | xxx |     |     |     |     |
| +13 |     | 0   | 0   |     | 1   |     |     |     |     |     |     | xxx | 0   |     |     |
| +14 | 0   |     | 0   | 0   |     |     |     |     |     |     |     | 0   | xxx | xxx |     |
| +15 |     |     |     | 0   | 5   |     |     |     | 10  |     |     |     |     |     | xxx |



A figura 5.7 mostra várias possibilidades de configurações tabu (tempo tabu e estrutura de vizinhança adotada).

Configurações Tabu

Tempo Tabu

☐ Fixo em 9 iterações

☐ Aleatório de

☒ Variável de 8 a 22

Número de iterações: 500

Estrutura de Vizinhança Utilizada

☐ Troca Simples

☒ Pseudo Trocas

Tipo de Trocas

☐ Simples

☒ Combinação 2 a 2

Avaliações Verdadeiras: 15

Figura 5.7 Configurações tabu e vizinhança.

#### 5.7.4 Estratégia de Proibição e de Liberação

Inicialmente é preciso definir como será caracterizado o que é tabu. Esta decisão envolve a escolha de um atributo e a maneira como será feita a regra de ativação tabu. **Estratégia de Proibição:** Esta estratégia vai gerenciar o que será incluído na lista tabu. A estratégia se resume em classificar como proibidos certos movimentos ou soluções, através de atributos, armazenando-os na lista tabu por um certo tempo. O objetivo é estabelecer um mecanismo que proíba certos movimentos (faça-os receber o status tabu), no sentido de evitar ciclagem e que remova a restrição tabu de um movimento de modo que ele possa novamente ser escolhido a partir de um certo momento ou por algum critério específico. Os atributos de um movimento tabu permanecem na lista de elementos tabu durante  $T$  iterações. Se o tempo de permanência dos atributos na lista se esgota, então eles são liberados do seu status tabu. Após um movimento ter sido realizado, o atributo deste movimento é imediatamente assinalado na matriz tabu com um tempo tabu escolhido (TTF ou TTA ou TTV).

**Estratégia de Liberação:** Esta estratégia vai gerenciar o que será retirado da lista tabu e em que momento isto ocorrerá, removendo as restrições tabus de um movimento de modo que ele possa ser escolhido a partir do instante da liberação do seu status tabu. Os atributos de um movimento tabu permanecem na lista durante  $T$  iterações, sendo liberados do seu status tabu quando o tempo de permanência na lista se esgota.

### 5.7.5 Critério de aspiração

Para tornar a busca mais flexível também temos como classificar um movimento de tabu para não tabu por algum critério de aspiração. Este critério é utilizado para liberar um movimento do seu status tabu antes que seu tempo tabu termine. Por exemplo: Se um certo movimento tabu levar a uma solução melhor que a melhor solução encontrada até o momento, libere-o. Ou, se todos os movimentos possíveis de serem realizados estão tabu, libere um deles segundo algum critério. Assim, se o movimento apresentar características muito boas e não ocasionar ciclagem, pode-se retirar o status tabu dele. Um movimento será aceito quando suas restrições tabu não forem violadas ou quando algum critério de aspiração retirar seu status tabu. Os critérios utilizados foram:

1. Um movimento deixa de ser tabu se levar a uma solução melhor que a melhor solução encontrada até o momento.
2. Se todos os movimentos possíveis de serem realizados estão tabu, o que menos piora a função objetivo é liberado.
3. Se não ocorrer melhora na função objetivo em T iterações (**PTE**), libere todos os elementos tabus.

### 5.7.6 Critério de parada

O critério utilizado para parar a busca tabu foi: **número pré estabelecido de iterações**.

## 5.8 Considerações sobre o capítulo

Observa-se que a escolha mais adequada da lista de candidatos à troca serve para restringir o número de elementos a serem analisados. Por exemplo: Podemos usar uma vizinhança reduzida quando o número de candidatos é muito grande. Poderíamos apenas analisar as trocas que possuem um bom histórico, ou selecionar aleatoriamente um vizinho, ou selecionar o primeiro movimento que passe por um critério específico.

Segundo [MUL97] a busca tabu tem-se mostrado muito eficiente na solução de problemas de otimização combinatorial, encontrando soluções, algumas vezes até melhores

do que as até agora encontradas. Para um maior detalhamento de busca tabu (BT) pode-se recorrer às referências citadas no final deste trabalho, principalmente [GLO89a], [GLO89b], [GLO90] e [GLO97].

O capítulo seguinte enfocará a metodologia utilizada na análise do problema.



# Capítulo 6

## Metodologia de análise do problema

Em relação à metodologia desenvolvida, a mesma fundamenta-se no conceito de departamento como centro de produção podendo ser entendido como "qualquer unidade de funcionamento independente da fábrica que colabora diretamente para a transformação de qualquer matéria prima em produto acabado" [OLI85] e [GAR89]. A partir desse conceito, gera-se uma representação na qual são consideradas: necessidades espaciais definidas pelos equipamentos, operações, manutenções, processamentos, transportes, serviços, acessos e segurança, para cada um dos centros produtivos.

A implementação da metodologia visa permitir a efetiva utilização do software criado, para a obtenção de resultados satisfatórios no tratamento de questões que envolvam o problema de layout, bem como, a publicação dos resultados através de artigos, trabalhos de graduação, dissertações, seminários, palestras e apresentações em congressos.

### 6.1 Materiais e Métodos

Nesta seção encontram-se discriminados as ferramentas e os equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Apresenta-se, nos capítulos subsequentes, o desenvolvimento da metodologia proposta, da etapa de descrição do problema aos resultados obtidos pela aplicação da metaheurística busca tabu.

#### 6.1.1 Materiais

*Os materiais utilizados foram os seguintes:*

- Computador *AMD Athlon* (tm) 1,2 GHz, 256 MB *RAM*.
- Monitor *SVGA* color, tela de 17" resolução 1152 x 864 e *High Color* (16 bits).

- Impressora HP 690c.
- *MS-Windows 2000*.
- *Object Pascal* usando *Delphi 5.0* - (Ferramenta utilizada para desenvolver o sistema).

### 6.1.2 Métodos

A metodologia de trabalho que foi empregada como forma de cadenciar o estudo proposto, em sua forma geral, possui os seguintes itens:

- **Identificação e prova do problema** dentro do contexto de complexidade computacional, identificando em qual categoria de complexidade o problema está inserido. Em seguida, fez-se a analogia com problemas propostos pela literatura provando a complexidade do problema.
- **Formulação/representação do problema** como um modelo heurístico.
- **Implementação do sistema.** Aqui, ocorreu a aplicação do problema diante de uma abordagem ótima (força bruta) e de uma abordagem aproximada usando a busca tabu. Para ambos os casos, uma solução inicial foi gerada (método construtivo) ou de forma aleatória, ou de forma manual ou através de um algoritmo que constrói a solução inicial considerando o grau de relacionamento que cada departamento mantém com os demais. Este relacionamento é aqui representado pelos fluxos entre os departamentos que estão interagindo no sistema.
- **Testes, Análise e comparação dos resultados obtidos.** Para verificar o desempenho do sistema desenvolvido, utilizou-se alguns problemas descritos na literatura a fim de se comparar os resultados obtidos pelo sistema com os respectivos resultados encontrados pelos problemas de *benchmark*. Baterias de testes foram realizadas abrangendo um número razoável de situações realistas. A bateria de testes fornece a possibilidade de análise e permite a comparação dos resultados com trabalhos similares desenvolvidos anteriormente. Desta forma, permite-se verificar a eficácia do sistema através da solução obtida.

*Os testes foram realizados sobre quatro baterias de problemas usando-se os seguintes procedimentos para a realização dos testes:*

***Primeira bateria de problemas:***

- Problemas *benchmark*. Usamos como referência o banco de problemas proposto por [NUG68], testes 5, 6, 7, 8, 12, 15, 20 e 30 departamentos, onde os departamentos são quadrados de  $1 \times 1$ .
- Testes executados apenas uma vez.
- Número máximo de iterações: 500.
- Lista tabu estática.
- Estrutura de vizinhança: TSS.

***Segunda bateria de problemas:***

- Problemas com 5, 6, 7, 8, 12, 15, 20 e 30 departamentos. As características de cada departamento são fornecidas por [TAM91], as matrizes de fluxos por [NUG68], e as dimensões do quadro externo para cada teste foram sugeridas por nós com base em casos realistas.
- Testes executados apenas uma vez.
- Número máximo de iterações: 1000.
- Lista tabu dinâmica: TTV.
- Estrutura de vizinhança: PTE.

***Terceira bateria de problemas:***

- Problemas com 8, 12, 15, 20 e 30 departamentos. As características de cada departamento são fornecidas por [TAM91], as matrizes de fluxos por [NUG68], e as dimensões do quadro externo para cada teste foram sugeridas por nós com base em casos realistas.
- Testes executados três vezes.
- Número máximo de iterações: 1000.
- Lista tabu dinâmica: TTV.
- Estrutura de vizinhança: PTE.



- Os departamentos estão sujeitos a um conjunto de restrições realistas.

***Quarta bateria de problemas:***

- Dois novos problemas são sugeridos. Um problema com 40 departamentos e outro com 55. Todos os dados de entrada são sugeridos por nós com base em casos realistas (Matrizes de fluxos, características geométricas, etc). Para maiores detalhes, consultar o anexo C.
- Testes executados três vezes.
- Número máximo de iterações: 1000.
- Lista tabu dinâmica: TTV.
- Estrutura de vizinhança: PTE.
- Os departamentos estão sujeitos a um conjunto de restrições realistas.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia, bem como o desempenho do algoritmo e as discussões sobre os mesmos.

# Capítulo 7

## Resultados e discussões

Os resultados experimentais foram obtidos com a aplicação da metodologia desenvolvida em problemas reportados na literatura, bem como em outros três conjuntos de problemas que envolvem situações realistas. Foram tomados problemas solucionados em trabalhos anteriores e os resultados obtidos foram comparados com as melhores soluções conhecidas na literatura. Os resultados obtidos mostraram soluções iguais ou ligeiramente inferiores, com um número de iterações e tempo computacional bastante reduzido.

### 7.1 Resultados

Para efeitos de comparação de resultados e facilidade de entrada de dados, considera-se para a análise dos resultados que o volume de tráfego (fluxo) entre os departamentos é constante e que o fluxo entre os departamentos é simétrico, ou seja, o volume de tráfego do departamento A para o departamento B é igual ao volume de tráfego do departamento B para o departamento A. Vale lembrar que para qualquer problema tratado aqui pode-se considerar uma matriz de fluxo assimétrica, onde neste caso, o fluxo entre A e B pode ser diferente do fluxo entre B e A. Realizou-se uma avaliação de maneira objetiva sobre o sistema desenvolvido.

Na primeira bateria de problemas, usou-se como referência o banco de problemas proposto por [NUG68], testes 5, 6, 7, 8, 12, 15, 20 e 30, onde os departamentos são quadrados de  $1 \times 1$ . Sugeriu-se aqui um novo teste com 40 departamentos (quadrados de  $1 \times 1$ ). Os resultados experimentais encontram-se na tabela 7.1.

Para validar os nossos resultados, comparamos os resultados obtidos pelo sistema AVOLI com os resultados apresentados por [TAT95], [SUR95], [CHI01] e com as melhores

soluções conhecidas para [NUG68], testes 5, 6, 7, 8, 12, 15, 20 e 30, conforme tabela 7.2. Todos os detalhes desta bateria de testes encontram-se no anexo A e os layouts correspondentes à melhor solução final de cada teste encontram-se no anexo B, figuras 8.2 a 8.10.

Tabela 7.1 Desempenho do algoritmo para problemas 1x1.

| Nº dep | Nº Iter | Tempo total (S) | Melhor iteração | Melhor Tempo (S) | Solução Inicial | Força bruta | Solução Final | Melhoria (%) |
|--------|---------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------|---------------|--------------|
| 5      | 100     | 3               | 8               | 0                | 58              | 50          | 50            | 13,79        |
| 6      | 100     | 3               | 1               | 0                | 86              | 86          | 86            | 0            |
| 7      | 100     | 3               | 23              | 1                | 162             | 148         | 148           | 8,64         |
| 8      | 100     | 3               | 8               | 0                | 228             | 214         | 214           | 6,14         |
| 12     | 300     | 29              | 39              | 5                | 678             | -           | 578           | 14,75        |
| 15     | 200     | 30              | 120             | 18               | 1280            | -           | 1150          | 10,16        |
| 20     | 500     | 202             | 300             | 172              | 3036            | -           | 2570          | 15,35        |
| 30     | 500     | 1159            | 171             | 393              | 7366            | -           | 6128          | 16,8         |
| 40*    | 250     | 1058            | 205             | 865              | 16880           | -           | 14250         | 15,58        |

- \*- teste 40 – teste sugerido, detalhes no apêndice B.

Tabela 7.2 Testes comparativos – [NUG68], [TAT95], [SUR95] e [CHI01].

| Nº dep | Nº Iter | Tempo total (S) | Melhor iteração | Melhor Tempo (S) | Nugent melhores | Tate e Smith | Suresh et al | Chiang | Avoli | Distância da melhor solução (%) |
|--------|---------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------|--------------|--------|-------|---------------------------------|
| 5      | 100     | 3               | 8               | 0                | 50              | 50           | 50           | 50     | 50    | 0,00                            |
| 6      | 100     | 3               | 1               | 0                | 86              | 86           | 86           | 86     | 86    | 0,00                            |
| 7      | 100     | 3               | 23              | 1                | 148             | 148          | 148          | 144    | 148   | 2,70                            |
| 8      | 100     | 3               | 8               | 0                | 214             | 214          | 214          | 212    | 214   | 0,93                            |
| 12     | 300     | 29              | 39              | 5                | 578             | 578          | 578          | 578    | 578   | 0,00                            |
| 15     | 200     | 30              | 120             | 18               | 1150            | 1150         | 1150         | 1110   | 1150  | 3,48                            |
| 20     | 500     | 202             | 300             | 172              | 2570            | 2598         | 2570         | 2564   | 2570  | 0,23                            |
| 30     | 500     | 1159            | 171             | 393              | 6124            | 6184         | 6168         | 6094   | 6128  | 0,55                            |
| 40*    | 250     | 1058            | 205             | 865              | -               | -            | -            | -      | 14250 | -                               |

A última coluna da tabela 7.2 mostra em termos percentual a distância das soluções encontradas pelo AVOLI em relação a melhor solução apresentada para os testes de [CHI01]. \*- teste 40 – teste sugerido, detalhes no apêndice B.

Na segunda bateria de experimentos, os testes foram realizados utilizando-se as matrizes de fluxos dadas por [NUG68] e as dimensões dos departamentos dadas por [TAM91], testes 5, 6, 7, 8, 12, 15, 20 e 30. Sugerimos as dimensões do quadro externo para cada teste. A tabela 7.3 mostra os resultados obtidos. Todos os detalhes desta bateria de testes



encontram-se no anexo A e os layouts correspondentes à melhor solução final de cada teste encontram-se no anexo B, figuras 8.11 a 8.18.

Tabela 7.3 Desempenho do algoritmo usando [NUG68] e [TAM91].

| Nº depto | * Quadro externo | Nº Iteração | Tempo total (S) | TTV     | PTE | Melhor iteração | Melhor Tempo (S) | Solução Inicial | Força bruta | Solução Final | Melhoria (%) |
|----------|------------------|-------------|-----------------|---------|-----|-----------------|------------------|-----------------|-------------|---------------|--------------|
| 5        | 14x09            | 250         | 9               | 5 - 9   | 4   | 38              | 1                | 272             | 232         | 232           | 14,71        |
| 6        | 13x11            | 250         | 10              | 5 - 9   | 6   | 93              | 3                | 456             | 376         | 376           | 17,54        |
| 7        | 16x10            | 250         | 12              | 7 - 12  | 6   | 96              | 4                | 1030            | 676         | 676           | 24,72        |
| 8        | 18x10            | 250         | 13              | 7 - 12  | 6   | 66              | 3                | 1210            | 974         | 974           | 19,50        |
| 12       | 19x13            | 1000        | 135             | 5 - 12  | 10  | 312             | 41               | 3229            | -           | 2347          | 27,31        |
| 15       | 20x15            | 500         | 141             | 8 - 18  | 15  | 378             | 104              | 7104            | -           | 4853          | 31,69        |
| 20       | 21x15            | 1000        | 329             | 9 - 20  | 10  | 527             | 175              | 13779           | -           | 9722          | 29,44        |
| 30       | 25x16            | 500         | 1176            | 10 - 15 | 30  | 90              | 208              | 34274           | -           | 22113         | 35,48        |

A última coluna da tabela 7.3 mostra o percentual de melhoria da solução final em relação à solução inicial.

\*C(h) x L(v) - Comprimento na horizontal e Largura na vertical.

Na terceira bateria de experimentos, os testes foram realizados acrescentando-se restrições realistas, utilizando-se as matrizes de fluxos dadas por [NUG68] e as dimensões dos departamentos dadas por [TAM91], testes 8, 12, 15, 20 e 30. Sugeriu-se as dimensões do quadro externo para cada teste. A tabela 7.4 mostra os resultados obtidos em três execuções para cada problema. Os experimentos foram realizados considerando-se as seguintes restrições:

- **Problema com oito departamentos.** O departamento 3 e o departamento 4 devem ficar na vertical, enquanto que o departamento 7 deve ficar na horizontal.
- **Problema com doze departamentos.** O departamento 7 deve ficar na horizontal, o departamento 10 na vertical, o departamento 1 deve ficar perto do departamento 7, o departamento 3 deve ficar perto do departamento 11, o departamento 3 deve ficar longe do departamento 4.
- **Problema com quinze departamentos.** O departamento 6 deve ficar na vertical, o departamento 4 deve ficar longe do departamento 10 e longe do departamento 15 também, o departamento 10 deve ficar longe do departamento 15.

- **Problema com vinte departamentos.** O departamento 7 deve ficar na horizontal, o 8 na vertical, o departamento 14 deve ficar longe do departamento 8, o departamento 3 deve ficar perto do departamento 13 e possui 2 áreas ocupadas.
- **Problema com trinta departamentos.** O departamento 2 deve ficar na horizontal, o departamento 6 deve ficar na vertical, o departamento 16 deve ficar longe do departamento 21, o departamento 1 deve ficar perto do departamento 20, possui 2 áreas ocupadas e 4 departamentos fixos. São chamados de departamentos fixos os departamentos previamente atribuídos a localizações específicas dentro do layout.

Observação: “Deve ficar perto” significa ser adjacente e “deve ficar longe” significa ser não adjacente.

Os resultados finais desta bateria de testes encontram-se na tabela 7.4. Todos os detalhes desta bateria de testes encontram-se no anexo A e os layouts correspondentes à melhor solução final de cada teste encontram-se no anexo B, figuras 8.19 a 8.23.

Tabela 7.4 Resultados considerando-se restrições de adjacência e de localização.

| Nº depto | * Quadro externo | Nº Iter | Tempo (S)** | TTV  | PTE | Solução Inicial | Melhor iteração |     |     | Melhor Tempo (S) |      |      | Melhor Solução Final |       |       | Melhoria (%) |       |       |
|----------|------------------|---------|-------------|------|-----|-----------------|-----------------|-----|-----|------------------|------|------|----------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|          |                  |         |             |      |     |                 | E1              | E2  | E3  | E1               | E2   | E3   | E1                   | E2    | E3    | E1           | E2    | E3    |
| 8        | 10x17            | 1000    | 55          | 7-12 | 6   | 1172            | 150             | 255 | 54  | 6                | 12   | 2    | 898                  | 898   | 898   | 23,38        | 23,38 | 23,40 |
| 12       | 18x13            | 1000    | 177         | 5-12 | 10  | 4174            | 119             | 578 | 769 | 22               | 111  | 134  | 2842                 | 2746  | 2744  | 31,91        | 34,21 | 34,30 |
| 15       | 20x14            | 1000    | 154         | 8-18 | 10  | 6870            | 489             | 644 | 531 | 76               | 100  | 83   | 5538                 | 5442  | 5306  | 19,39        | 20,79 | 22,80 |
| 20       | 21x15            | 1000    | 448         | 9-20 | 12  | 14502           | 982             | 830 | 191 | 440              | 378  | 87   | 10338                | 10720 | 10650 | 28,40        | 26,08 | 26,56 |
| 30       | 25x16            | 1000    | 1786        | 8-18 | 12  | 28660           | 800             | 959 | 768 | 1465             | 1732 | 1359 | 22220                | 22298 | 22188 | 22,47        | 22,20 | 22,60 |

Para cada teste os procedimentos foram executados três vezes. As três últimas colunas da tabela 7.4 mostram o percentual de melhoria da solução final em relação à solução inicial em cada E execução.

\*C(h) x L(v) - Comprimento na horizontal e Largura na vertical.

\*\* Tempo (S) Tempo total para a Execução (E) do melhor teste.

Uma das vantagens da metodologia desenvolvida em relação as soluções consultadas na literatura foi o fato de se poder considerar um conjunto mais abrangente de restrições em um único trabalho, bem como, a possibilidade de se configurar os parâmetros da BT para tornar a busca mais explorativa. A obtenção de resultados compatíveis com os resultados apresentados pelos problemas *benchmark* foi outra vantagem observada. Estas vantagens



podem caracterizar o sistema apresentado como uma nova ferramenta para o auxílio na geração de layouts otimizados, permitindo ao projetista do layout configurar vários parâmetros para uma busca mais afinada, bem como, consultar o histórico gerado na solução dos problemas, a fim de testar outras soluções também apresentadas em termos quantitativos como igualmente boas, podendo assim optar por esta ou aquela solução que melhor se adequar às exigências impostas.

## 7.2 Validação dos Resultados

Como forma de comprovar a eficácia da ferramenta desenvolvida executaram-se os procedimentos em uma nova bateria de testes. Para a quarta bateria de experimentos propôs-se dois novos problemas. Realizaram-se testes com 40 e 55 departamentos. Os experimentos foram realizados considerando-se as seguintes restrições:

- **Problema com quarenta departamentos.** Neste teste foram consideradas 3 áreas ocupadas. Os departamentos 8, 19 e 29 devem ficar na vertical, os departamentos 4, 10 e 17 devem ficar na horizontal, o departamento 5 deve ficar longe do departamento 32, o departamento 2 deve ficar perto do departamento 5 e também deve ficar perto do departamento 32.
- **Problema com cinquenta e cinco departamentos.** Neste teste os departamentos 8, 9, 19 e 29 devem ficar na vertical, os departamentos 10 e 17 devem ficar na horizontal, o departamento 9 deve ficar perto do departamento 47, o departamento 15 deve ficar longe do departamento 19, o departamento 23 deve ficar longe do departamento fixo 3 e o departamento 14 deve ficar longe do departamento fixo 4, considerou-se ainda 5 áreas ocupadas, as quais em situações reais poderiam representar corredores, área de carga/descarga, etc. Dos 55 departamentos do teste, 5 são atribuídos previamente a localizações específicas dentro do layout, por isso são chamados de departamentos fixos.

Observação: “Deve ficar perto” significa ser adjacente e “deve ficar longe” significa ser não adjacente.

A tabela 7.5 mostra os resultados obtidos em três execuções para cada problema. Todos os detalhes desta bateria de testes encontram-se no anexo C.



Tabela 7.5 Resultados – Problemas propostos.

| Nº<br>depto | * Quadro<br>externo | Nº<br>Iteração | Tempo<br>(S)** | TTV  | PTE | Solução<br>Inicial | Melhor iteração |     |     | Melhor Tempo (S) |      |      | Solução Final |        |        | Melhoria (%) |       |       |
|-------------|---------------------|----------------|----------------|------|-----|--------------------|-----------------|-----|-----|------------------|------|------|---------------|--------|--------|--------------|-------|-------|
|             |                     |                |                |      |     |                    | E1              | E2  | E3  | E1               | E2   | E3   | E1            | E2     | E3     | E1           | E2    | E3    |
| 40          | 60x42               | 1000           | 5036           | 8-18 | 12  | 99546              | 139             | 294 | 139 | 692              | 1392 | 703  | 79988         | 78024  | 79988  | 19,65        | 21,60 | 19,65 |
| 55          | 90x60               | 500            | 12315          | 7-14 | 20  | 182154             | 139             | 122 | 287 | 2290             | 2041 | 6966 | 140222        | 139038 | 132828 | 23,02        | 23,67 | 27,10 |

Para cada teste os procedimentos foram executados três vezes.

As três últimas colunas da tabela 7.5 mostram o percentual de melhoria da solução final em relação à solução inicial em cada E execução.

\*C(h) x L(v) - Comprimento na horizontal e Largura na vertical.

\*\* Tempo (S) Tempo total para a Execução (E) do melhor teste.

Uma das vantagens destacadas para estes testes vêm do fato de que para todos os dois problemas propostos obteve-se bons resultados, condizentes com os esperados. Pode-se concluir que a metodologia desenvolvida foi capaz de encontrar resultados satisfatórios, se comparados em termos da melhora percentual com os resultados já validados reportados pela literatura.

### 7.3 Considerações sobre o capítulo

A eficiência do sistema pôde ser comprovada através do conjunto de experimentos realizados, onde não se considera apenas o custo de interconexão entre os departamentos, mas também um conjunto de características geométricas associadas. As várias restrições realistas incorporadas ao problema de layout foram consideradas simultaneamente em alguns testes, o que serviu para validar os resultados obtidos pelo sistema. Os detalhes de todos os experimentos realizados nesta dissertação encontram-se nos anexos A, B, C. No anexo D é apresentado uma introdução ao sistema AVOLI.

O sistema desenvolvido pôde resolver problemas realistas com 55 departamentos em tempo computacional razoável. Ainda em relação ao tempo computacional, pode-se concluir que, devido as característica mais ou menos estáticas do layout de uma dada planta industrial, este, não é tão significativo, uma vez que as modificações que venham a ser realizadas no layout, passarão antecipadamente por uma fase de análise, onde durante este período, o sistema poderá estar sendo executado em *background*, procurando por soluções de melhor qualidade que tornarão o projeto e a execução muito mais confiáveis.

No capítulo seguinte encontram-se as conclusões finais sobre este trabalho, além de algumas propostas de trabalhos futuros que poderão ser realizados a partir deste estudo.

## Capítulo 8

### Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo apresentamos algumas conclusões sobre os resultados obtidos neste trabalho e propomos alguns trabalhos que poderão ser desenvolvidos a partir deste estudo.

#### 8.1 Conclusões

Este trabalho apresentou a ferramenta computacional chamada de Ambiente Visual para Otimização de Layout Industrial (AVOLI) para resolver o problema de layout com restrições geométricas quando o local destinado ao layout tem suas dimensões previamente conhecidas. A metodologia desenvolvida mostrou-se adequada para a realização do objetivo proposto, visto que bons resultados foram obtidos para problemas similares. Nossos experimentos demonstram que as restrições consideradas têm um impacto significativo na resposta dada pelo sistema, e que também, o quadro externo pode influenciar nos resultados obtidos, portanto, a escolha mais adequada de suas dimensões e o tratamento de um número menor de restrições, pode produzir melhores resultados.

A abordagem de solução utilizada pode ser dividida em dois passos. No primeiro passo, obteve-se construtivamente uma solução inicial viável. No segundo passo, aplicou-se a busca tabu para o melhoramento da solução inicial. Três estruturas de vizinhança foram implementadas para o problema, e seus efeitos analisados, tomando por comparação problemas de solução conhecida na literatura. As soluções obtidas se mostraram iguais ou ligeiramente inferiores que as melhores soluções conhecidas para os problemas analisados na primeira bateria de problemas.



Um fator importante foi observar o efeito da aplicação da lista tabu dinâmica em conjunto com as estruturas de vizinhança implementadas e testadas.

Fica claro que com uma vizinhança grande, o universo de possibilidades é muito maior e se torna inviável a realização efetiva da verificação de cada possibilidade, assim, a fim de se poder ver a “cara” das possíveis boas soluções foi desenvolvida a vizinhança pseudo troca expandida para permitir a análise prévia do que aconteceria se este ou aquele movimento fosse verdadeiramente realizado. A estrutura de vizinhança pseudo troca expandida (PTE) mostrou-se muito mais eficiente que as demais (TSS e PTS) na maioria dos testes realizados, o que nos permitiu concluir que, quando se tem um número maior de possibilidades para se explorar, tem-se muito mais chance de encontrar soluções melhores.

Quando a configuração de lista tabu dinâmica variável e a estrutura de vizinhança pseudo troca expandida foram combinadas e conjuntamente aplicadas na terceira e quarta bateria de problemas, obtivemos excelentes resultados para a maioria dos testes. Uma vez detectada esta melhor qualidade nas soluções geradas a partir da combinação acima mencionada, passamos então a variar o tamanho da lista tabu, modificando os limites inferiores e superiores. Observou-se que para problemas pequenos com até oito departamentos, um tempo tabu variando entre 5 e 8 iterações apresenta os melhores resultados, já para problemas de maiores proporções sujeitos a uma conjunto de restrições, portanto muito mais próximos de um problema real, o tempo tabu que permitiu melhoras mais significativas teve seus limites variando entre 8 e 18 iterações.

Problemas maiores foram propostos e tratados em tempo computacional aceitável. Uma vez que não se encontrou na literatura problemas de maior porte e que considerasse o conjunto de restrições impostas para serem comparados, aceitamos que os resultados encontrados, se comparados em termos percentuais, com os problemas benchmark, são satisfatórios. Os maiores problemas tratados por [CHI01] possuem 40 departamentos (um problema com quadrados de 1x1 e outro com áreas variadas), porém os dados de entrada do problema (exemplo: matriz de fluxo, dimensões do quadro externo, entre outros) não são fornecidos, assim é impossível a comparação dos resultados do problema proposto por [CHI01] com o problema de 40 departamentos quadrados de 1x1 proposto por nós na primeira e quarta baterias de problemas.

Para a primeira bateria de problemas, dos 8 problemas conhecidos, 3 tiveram a melhor solução igualada, 3 tiveram uma solução menos de 1% inferior e 2 tiveram solução cerca de 3% inferior. Já os tempos computacionais mostraram-se plenamente aceitáveis.

Para a segunda bateria de problemas, os problemas 5, 6, 7, e 8, obtiveram soluções ótimas (força bruta), que foram igualadas pelo modelo heurístico aqui descrito. Para os problemas 12, 15, 20 e 30, comparações são inapropriadas, uma vez que não foram encontrados na literatura problemas que fossem tratados nas mesmas condições aqui testadas.

Observa-se que a melhoria alcançada na solução final dos problemas da segunda bateria, varia de 14% a 32%. Nota-se também que a eficiência de convergência do algoritmo é grande, visto que menos de 10% das iterações previstas foram suficientes para encontrar a melhor solução. Para os problemas 12, 15, 20 e 30 não se pode garantir que a solução encontrada seja ótima.

Para a terceira bateria de problemas, nota-se inicialmente que a melhor solução é alcançada geralmente com um número inicial ou intermediário de iterações, o que demonstra que o número de iterações poderia ser reduzido. Observa-se ainda que a inclusão das restrições adicionais nesta bateria de problemas modificou substancialmente os tempos computacionais, pois todos os problemas levaram mais tempo até que se encontrasse a melhor solução. A melhoria das soluções obtidas no passo dois comparadas com as soluções iniciais do passo um variaram de 19% a 34%.

Pôde-se observar que para problemas maiores, como é o caso da quarta bateria de problemas, que a diferença entre a qualidade das soluções nas três tentativas variou de 19% a 21% para o problema 40 e de 23% a 27% para o problema 55.

Dessa forma, fica claro que o objetivo inicial desta dissertação que era a otimização de layout em ambientes industriais realistas usando busca tabu foi alcançado, uma vez que na maioria dos problemas tratados houve uma redução no custos finais.

## 8.2 Trabalhos Futuros

A partir deste estudo torna-se possível o desenvolvimento de alguns trabalhos futuros. As propostas são as seguintes:

- Melhorar a performance do algoritmo;
- Criar um ambiente visual mais flexível (ambiente gráfico);
- Desenvolver layouts detalhados;
- Adaptar o sistema para o tratamento de layouts de múltiplos pisos (multi-níveis);
- Considerar departamentos com formas irregulares.
- Desenvolver uma metodologia para a geração automática da lista tabu dinâmica.
- Utilizar outras abordagens.
- Considerar outras restrições realistas.

Para atender a todos estes objetivos, torna-se necessário pesquisas mais aprofundadas para tratar as questões aqui levantadas. Um objetivo decorrente é criar uma metodologia de trabalho para atuar no projeto de layouts de empresas de manufatura.



# Anexo A

Biblioteca Central - PUC/PR

## Dados de entrada

As informações pertinentes aos problemas tratados nesta dissertação encontram-se a seguir discriminados.

### A.1 Matrizes de fluxos

A seguir encontram-se as matrizes de fluxos (as matrizes são simétricas), para a primeira, segunda e terceira bateria de testes.

Tabela 8.1 Matriz de fluxo – para 5 depts.

|    | +1  | +2  | +3  | +4  | +5  |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +1 | XXX | 5   | 2   | 4   | 1   |
| +2 | 5   | XXX | 3   | 0   | 2   |
| +3 | 2   | 3   | XXX | 0   | 0   |
| +4 | 4   | 0   | 0   | XXX | 5   |
| +5 | 1   | 2   | 0   | 5   | XXX |

Tabela 8.2 Matriz de fluxo – para 6 depts.

|    | +1  | +2  | +3  | +4  | +5  | +6  |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +1 | XXX | 5   | 2   | 4   | 1   | 0   |
| +2 | 5   | XXX | 3   | 0   | 2   | 2   |
| +3 | 2   | 3   | XXX | 0   | 0   | 0   |
| +4 | 4   | 0   | 0   | XXX | 5   | 2   |
| +5 | 1   | 2   | 0   | 5   | XXX | 10  |
| +6 | 0   | 2   | 0   | 2   | 10  | XXX |

Tabela 8.3 Matriz de fluxo – para 7 deptos.

|    | +1  | +2  | +3  | +4  | +5  | +6  | +7  |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +1 | XXX | 5   | 2   | 4   | 1   | 0   | 0   |
| +2 | 5   | XXX | 3   | 0   | 2   | 2   | 2   |
| +3 | 2   | 3   | XXX | 0   | 0   | 0   | 0   |
| +4 | 4   | 0   | 0   | XXX | 5   | 2   | 2   |
| +5 | 1   | 2   | 0   | 5   | XXX | 10  | 0   |
| +6 | 0   | 2   | 0   | 2   | 10  | XXX | 5   |
| +7 | 0   | 2   | 0   | 2   | 0   | 5   | XXX |

Tabela 8.4 Matriz de fluxo – para 8 deptos.

|    | +1 | +2 | +3 | +4 | +5 | +6 | +7 | +8 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| +1 | 0  | 5  | 2  | 4  | 1  | 0  | 0  | 6  |
| +2 | 5  | 0  | 3  | 0  | 2  | 2  | 2  | 0  |
| +3 | 2  | 3  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  |
| +4 | 4  | 0  | 0  | 0  | 5  | 2  | 2  | 10 |
| +5 | 1  | 2  | 0  | 5  | 0  | 10 | 0  | 0  |
| +6 | 0  | 2  | 0  | 2  | 10 | 0  | 5  | 1  |
| +7 | 0  | 2  | 0  | 2  | 0  | 5  | 0  | 10 |
| +8 | 6  | 0  | 5  | 10 | 0  | 1  | 10 | 0  |

Tabela 8.5 Matriz de fluxo – para 12 deptos.

|     | +1  | +2  | +3  | +4  | +5  | +6  | +7  | +8  | +9  | +10 | +11 | +12 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +1  | XXX | 5   | 2   | 4   | 1   | 0   | 0   | 6   | 2   | 1   | 1   | 1   |
| +2  | 5   | XXX | 3   | 0   | 2   | 2   | 2   | 0   | 4   | 5   | 0   | 0   |
| +3  | 2   | 3   | XXX | 0   | 0   | 0   | 0   | 5   | 5   | 2   | 2   | 2   |
| +4  | 4   | 0   | 0   | XXX | 5   | 2   | 2   | 10  | 0   | 0   | 5   | 5   |
| +5  | 1   | 2   | 0   | 5   | XXX | 10  | 0   | 0   | 0   | 5   | 1   | 1   |
| +6  | 0   | 2   | 0   | 2   | 10  | XXX | 5   | 1   | 1   | 5   | 4   | 0   |
| +7  | 0   | 2   | 0   | 2   | 0   | 5   | XXX | 10  | 5   | 2   | 3   | 3   |
| +8  | 6   | 0   | 5   | 10  | 0   | 1   | 10  | XXX | 0   | 0   | 5   | 0   |
| +9  | 2   | 4   | 5   | 0   | 0   | 1   | 5   | 0   | XXX | 0   | 10  | 10  |
| +10 | 1   | 5   | 2   | 0   | 5   | 5   | 2   | 0   | 0   | XXX | 5   | 0   |
| +11 | 1   | 0   | 2   | 5   | 1   | 4   | 3   | 5   | 10  | 5   | XXX | 2   |
| +12 | 1   | 0   | 2   | 5   | 1   | 0   | 3   | 0   | 10  | 0   | 2   | XXX |

Tabela 8.6 Matriz de fluxo – para 15 depts.

|     | +1  | +2  | +3  | +4  | +5  | +6  | +7  | +8  | +9  | +10 | +11 | +12 | +13 | +14 | +15 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +1  | XXX | 10  | 0   | 5   | 1   | 0   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 0   | 4   | 0   | 0   |
| +2  | 10  | XXX | 1   | 3   | 2   | 2   | 2   | 3   | 2   | 0   | 2   | 0   | 10  | 5   | 0   |
| +3  | 0   | 1   | XXX | 10  | 2   | 0   | 2   | 5   | 4   | 5   | 2   | 2   | 5   | 5   | 5   |
| +4  | 5   | 3   | 10  | XXX | 1   | 1   | 5   | 0   | 0   | 2   | 1   | 0   | 2   | 5   | 0   |
| +5  | 1   | 2   | 2   | 1   | XXX | 3   | 5   | 5   | 5   | 1   | 0   | 3   | 0   | 5   | 5   |
| +6  | 0   | 2   | 0   | 1   | 3   | XXX | 2   | 2   | 1   | 5   | 0   | 0   | 2   | 5   | 10  |
| +7  | 1   | 2   | 2   | 5   | 5   | 2   | XXX | 6   | 0   | 1   | 5   | 5   | 5   | 1   | 0   |
| +8  | 2   | 3   | 5   | 0   | 5   | 2   | 6   | XXX | 5   | 2   | 10  | 0   | 5   | 0   | 0   |
| +9  | 2   | 2   | 4   | 0   | 5   | 1   | 0   | 5   | XXX | 0   | 10  | 5   | 10  | 0   | 2   |
| +10 | 2   | 0   | 5   | 2   | 1   | 5   | 1   | 2   | 0   | XXX | 0   | 4   | 0   | 0   | 5   |
| +11 | 2   | 2   | 2   | 1   | 0   | 0   | 5   | 10  | 10  | 0   | XXX | 5   | 0   | 5   | 0   |
| +12 | 0   | 0   | 2   | 0   | 3   | 0   | 5   | 0   | 5   | 4   | 5   | XXX | 3   | 3   | 0   |
| +13 | 4   | 10  | 5   | 2   | 0   | 2   | 5   | 5   | 10  | 0   | 0   | 3   | XXX | 10  | 2   |
| +14 | 0   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   | 1   | 0   | 0   | 0   | 5   | 3   | 10  | XXX | 4   |
| +15 | 0   | 0   | 5   | 0   | 5   | 10  | 0   | 0   | 2   | 5   | 0   | 0   | 2   | 4   | XXX |

Tabela 8.7 Matriz de fluxo – para 20 depts.

|     | +1  | +2  | +3  | +4  | +5  | +6  | +7  | +8  | +9  | +10 | +11 | +12 | +13 | +14 | +15 | +16 | +17 | +18 | +19 | +20 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +1  | XXX | 0   | 5   | 0   | 5   | 2   | 10  | 3   | 1   | 5   | 5   | 5   | 0   | 0   | 5   | 4   | 4   | 0   | 0   | 1   |
| +2  | 0   | XXX | 3   | 10  | 5   | 1   | 5   | 1   | 2   | 4   | 2   | 5   | 0   | 10  | 10  | 3   | 0   | 5   | 10  | 5   |
| +3  | 5   | 3   | XXX | 2   | 0   | 5   | 2   | 4   | 4   | 5   | 0   | 0   | 0   | 5   | 1   | 0   | 0   | 5   | 0   | 0   |
| +4  | 0   | 10  | 2   | XXX | 1   | 0   | 5   | 2   | 1   | 0   | 10  | 2   | 2   | 0   | 2   | 1   | 5   | 2   | 5   | 5   |
| +5  | 5   | 5   | 0   | 1   | XXX | 5   | 6   | 5   | 2   | 5   | 2   | 0   | 5   | 1   | 1   | 1   | 5   | 2   | 5   | 1   |
| +6  | 2   | 1   | 5   | 0   | 5   | XXX | 5   | 2   | 1   | 6   | 0   | 0   | 10  | 0   | 2   | 0   | 1   | 0   | 1   | 5   |
| +7  | 10  | 5   | 2   | 5   | 6   | 5   | XXX | 0   | 0   | 0   | 5   | 10  | 2   | 2   | 5   | 1   | 2   | 1   | 0   | 10  |
| +8  | 3   | 1   | 4   | 2   | 5   | 2   | 0   | XXX | 1   | 1   | 10  | 10  | 2   | 0   | 10  | 2   | 5   | 2   | 2   | 10  |
| +9  | 1   | 2   | 4   | 1   | 2   | 1   | 0   | 1   | XXX | 2   | 0   | 3   | 5   | 5   | 0   | 5   | 0   | 0   | 0   | 2   |
| +10 | 5   | 4   | 5   | 0   | 5   | 6   | 0   | 1   | 2   | XXX | 5   | 5   | 0   | 5   | 1   | 0   | 0   | 5   | 5   | 2   |
| +11 | 5   | 2   | 0   | 10  | 2   | 0   | 5   | 10  | 0   | 5   | XXX | 5   | 2   | 5   | 1   | 10  | 0   | 2   | 2   | 5   |
| +12 | 5   | 5   | 0   | 2   | 0   | 0   | 10  | 10  | 3   | 5   | 5   | XXX | 2   | 10  | 5   | 0   | 1   | 1   | 2   | 5   |
| +13 | 0   | 0   | 0   | 2   | 5   | 10  | 2   | 2   | 5   | 0   | 2   | 2   | XXX | 2   | 2   | 1   | 0   | 0   | 0   | 5   |
| +14 | 0   | 10  | 5   | 0   | 1   | 0   | 2   | 0   | 5   | 5   | 5   | 10  | 2   | XXX | 5   | 5   | 1   | 5   | 5   | 0   |
| +15 | 5   | 10  | 1   | 2   | 1   | 2   | 5   | 10  | 0   | 1   | 1   | 5   | 2   | 5   | XXX | 3   | 0   | 5   | 10  | 10  |
| +16 | 4   | 3   | 0   | 1   | 1   | 0   | 1   | 2   | 5   | 0   | 10  | 0   | 1   | 5   | 3   | XXX | 0   | 0   | 2   | 0   |
| +17 | 4   | 0   | 0   | 5   | 5   | 1   | 2   | 5   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 0   | XXX | 5   | 2   | 0   |
| +18 | 0   | 5   | 5   | 2   | 2   | 0   | 1   | 2   | 0   | 5   | 2   | 1   | 0   | 5   | 5   | 0   | 5   | XXX | 1   | 1   |
| +19 | 0   | 10  | 0   | 5   | 5   | 1   | 0   | 2   | 0   | 5   | 2   | 2   | 0   | 5   | 10  | 2   | 2   | 1   | XXX | 6   |
| +20 | 1   | 5   | 0   | 5   | 1   | 5   | 10  | 10  | 2   | 2   | 5   | 5   | 5   | 0   | 10  | 0   | 0   | 1   | 6   | XXX |



Tabela 8.8 Matriz de fluxo – para 30 deptos.

|     | +1  | +2  | +3  | +4  | +5  | +6  | +7  | +8  | +9  | +10 | +11 | +12 | +13 | +14 | +15 | +16 | +17 | +18 | +19 | +20 | +21 | +22 | +23 | +24 | +25 | +26 | +27 | +28 | +29 | +30 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +1  | xxx | 3   | 2   | 0   | 0   | 2   | 10  | 5   | 0   | 5   | 2   | 5   | 0   | 0   | 2   | 0   | 5   | 6   | 3   | 0   | 1   | 10  | 0   | 10  | 2   | 1   | 1   | 1   | 0   | 1   |
| +2  | 3   | xxx | 4   | 0   | 10  | 4   | 0   | 0   | 2   | 2   | 1   | 0   | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 0   | 1   | 6   | 1   | 0   | 1   | 2   | 2   | 5   | 1   | 10  | 5   |
| +3  | 2   | 4   | xxx | 3   | 4   | 0   | 5   | 5   | 5   | 1   | 4   | 1   | 0   | 4   | 0   | 4   | 0   | 6   | 3   | 2   | 5   | 5   | 2   | 1   | 0   | 0   | 3   | 1   | 0   | 2   |
| +4  | 0   | 0   | 3   | xxx | 0   | 0   | 0   | 2   | 2   | 0   | 6   | 0   | 2   | 5   | 2   | 5   | 1   | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 4   | 0   | 2   | 0   | 2   | 2   | 5   | 5   |
| +5  | 0   | 10  | 4   | 0   | xxx | 5   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 1   | 0   | 0   | 2   | 0   | 5   | 1   | 0   | 2   | 1   | 0   | 2   | 1   |
| +6  | 2   | 4   | 0   | 0   | 5   | xxx | 1   | 2   | 2   | 1   | 4   | 10  | 10  | 2   | 5   | 5   | 0   | 5   | 0   | 0   | 0   | 10  | 0   | 0   | 0   | 4   | 0   | 10  | 1   | 1   |
| +7  | 10  | 0   | 5   | 0   | 2   | 1   | xxx | 10  | 10  | 5   | 10  | 10  | 6   | 0   | 0   | 10  | 2   | 1   | 10  | 1   | 5   | 5   | 2   | 3   | 5   | 0   | 2   | 0   | 1   | 3   |
| +8  | 5   | 0   | 5   | 2   | 0   | 2   | 10  | xxx | 1   | 3   | 5   | 0   | 0   | 0   | 2   | 4   | 5   | 2   | 10  | 6   | 0   | 5   | 5   | 2   | 5   | 0   | 5   | 5   | 0   | 2   |
| +9  | 0   | 2   | 5   | 2   | 0   | 2   | 10  | 1   | xxx | 10  | 2   | 1   | 5   | 2   | 0   | 3   | 0   | 2   | 0   | 0   | 4   | 0   | 5   | 2   | 5   | 0   | 5   | 2   | 5   | 2   |
| +10 | 5   | 2   | 1   | 0   | 0   | 1   | 5   | 3   | 10  | xxx | 5   | 5   | 6   | 0   | 1   | 5   | 5   | 0   | 5   | 2   | 3   | 5   | 0   | 5   | 2   | 10  | 10  | 1   | 5   | 2   |
| +11 | 2   | 1   | 4   | 6   | 0   | 4   | 10  | 5   | 2   | 5   | xxx | 0   | 0   | 1   | 2   | 1   | 0   | 2   | 0   | 0   | 0   | 6   | 6   | 0   | 4   | 5   | 3   | 2   | 2   | 10  |
| +12 | 5   | 0   | 1   | 0   | 2   | 10  | 10  | 0   | 1   | 5   | 0   | xxx | 5   | 5   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 0   | 4   | 5   | 10  | 1   | 0   | 0   | 0   | 1   | 5   |
| +13 | 0   | 5   | 0   | 2   | 0   | 10  | 6   | 0   | 5   | 6   | 0   | 5   | xxx | 2   | 0   | 4   | 2   | 2   | 1   | 0   | 6   | 2   | 1   | 5   | 5   | 0   | 0   | 1   | 5   | 5   |
| +14 | 0   | 0   | 4   | 5   | 0   | 2   | 0   | 0   | 2   | 0   | 1   | 5   | 2   | xxx | 2   | 1   | 0   | 5   | 3   | 10  | 0   | 0   | 4   | 2   | 0   | 0   | 4   | 2   | 5   | 5   |
| +15 | 2   | 0   | 0   | 2   | 0   | 5   | 0   | 2   | 0   | 1   | 2   | 2   | 0   | 2   | xxx | 4   | 5   | 1   | 0   | 1   | 0   | 5   | 0   | 2   | 0   | 0   | 5   | 1   | 1   | 0   |
| +16 | 0   | 0   | 4   | 5   | 0   | 5   | 10  | 4   | 3   | 5   | 1   | 0   | 4   | 1   | 4   | xxx | 0   | 3   | 0   | 2   | 2   | 0   | 2   | 0   | 5   | 0   | 5   | 2   | 5   | 10  |
| +17 | 5   | 0   | 0   | 1   | 2   | 0   | 2   | 5   | 0   | 5   | 0   | 0   | 2   | 0   | 5   | 0   | xxx | 2   | 2   | 0   | 0   | 0   | 6   | 5   | 3   | 5   | 0   | 0   | 5   | 1   |
| +18 | 6   | 2   | 6   | 1   | 1   | 5   | 1   | 2   | 2   | 0   | 2   | 0   | 2   | 5   | 1   | 3   | 2   | xxx | 5   | 1   | 2   | 10  | 10  | 4   | 0   | 0   | 5   | 0   | 0   | 0   |
| +19 | 3   | 0   | 3   | 1   | 0   | 0   | 10  | 10  | 0   | 5   | 0   | 0   | 1   | 3   | 0   | 0   | 2   | 5   | xxx | 0   | 5   | 5   | 1   | 0   | 5   | 2   | 1   | 2   | 10  | 10  |
| +20 | 0   | 1   | 2   | 1   | 0   | 0   | 1   | 6   | 0   | 2   | 0   | 2   | 0   | 10  | 1   | 2   | 0   | 1   | 0   | xxx | 5   | 2   | 1   | 3   | 1   | 5   | 6   | 5   | 5   | 3   |
| +21 | 1   | 6   | 5   | 2   | 2   | 0   | 5   | 0   | 4   | 3   | 0   | 0   | 6   | 0   | 0   | 2   | 0   | 2   | 5   | 5   | xxx | 4   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 5   | 0   | 0   |
| +22 | 10  | 1   | 5   | 2   | 0   | 10  | 5   | 5   | 0   | 5   | 6   | 4   | 2   | 0   | 5   | 0   | 0   | 10  | 5   | 2   | 4   | xxx | 5   | 0   | 4   | 4   | 5   | 0   | 2   | 5   |
| +23 | 0   | 0   | 2   | 4   | 5   | 0   | 2   | 5   | 5   | 0   | 6   | 5   | 1   | 4   | 0   | 2   | 6   | 10  | 1   | 1   | 0   | 5   | xxx | 0   | 4   | 4   | 1   | 0   | 2   | 2   |
| +24 | 10  | 1   | 1   | 0   | 1   | 0   | 3   | 2   | 2   | 5   | 0   | 10  | 5   | 2   | 2   | 0   | 5   | 4   | 0   | 3   | 1   | 0   | 0   | xxx | 5   | 5   | 0   | 1   | 0   | 0   |
| +25 | 2   | 2   | 0   | 2   | 0   | 0   | 5   | 5   | 0   | 2   | 4   | 1   | 5   | 0   | 0   | 5   | 3   | 0   | 5   | 1   | 0   | 4   | 4   | 5   | xxx | 1   | 0   | 10  | 1   | 0   |
| +26 | 1   | 2   | 0   | 0   | 2   | 4   | 0   | 0   | 5   | 10  | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 5   | 0   | 2   | 5   | 0   | 4   | 4   | 5   | 1   | xxx | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| +27 | 1   | 5   | 3   | 2   | 1   | 0   | 2   | 5   | 2   | 10  | 3   | 0   | 0   | 4   | 5   | 5   | 0   | 5   | 1   | 6   | 0   | 5   | 1   | 0   | 0   | 0   | xxx | 0   | 0   | 10  |
| +28 | 1   | 1   | 1   | 2   | 0   | 10  | 0   | 5   | 2   | 1   | 2   | 0   | 1   | 2   | 1   | 2   | 0   | 0   | 2   | 5   | 5   | 0   | 0   | 1   | 10  | 0   | 0   | xxx | 2   | 2   |
| +29 | 0   | 10  | 0   | 5   | 2   | 1   | 1   | 0   | 5   | 5   | 2   | 0   | 5   | 5   | 1   | 5   | 5   | 0   | 10  | 5   | 0   | 2   | 2   | 0   | 1   | 0   | 0   | 2   | xxx | 2   |
| +30 | 1   | 5   | 2   | 5   | 1   | 1   | 3   | 2   | 2   | 2   | 10  | 1   | 5   | 5   | 0   | 10  | 1   | 0   | 10  | 3   | 0   | 5   | 2   | 0   | 0   | 0   | 10  | 2   | 2   | xxx |

Tabela 8.9 Matriz de fluxo – teste 1x1 com 40 deptos.

|     | +1 | +2 | +3 | +4 | +5 | +6 | +7 | +8 | +9 | +10 | +11 | +12 | +13 | +14 | +15 | +16 | +17 | +18 | +19 | +20 | +21 | +22 | +23 | +24 | +25 | +26 | +27 | +28 | +29 | +30 | +31 | +32 | +33 | +34 | +35 | +36 | +37 | +38 | +39 | +40 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +1  | 0  | 3  | 2  | 0  | 0  | 2  | 10 | 5  | 0  | 5   | 2   | 5   | 0   | 0   | 2   | 0   | 5   | 6   | 3   | 0   | 1   | 10  | 0   | 10  | 2   | 1   | 1   | 1   | 0   | 1   | 1   | 10  | 0   | 10  | 2   | 1   | 1   | 1   | 0   | 1   |
| +2  | 3  | 0  | 4  | 0  | 10 | 4  | 0  | 0  | 2  | 2   | 1   | 0   | 5   | 0   | 0   | 0   | 2   | 0   | 1   | 6   | 1   | 0   | 1   | 2   | 2   | 5   | 1   | 10  | 5   | 6   | 1   | 0   | 1   | 2   | 2   | 5   | 1   | 10  | 5   |     |
| +3  | 2  | 4  | 0  | 3  | 4  | 0  | 5  | 5  | 1  | 4   | 1   | 0   | 4   | 0   | 4   | 0   | 6   | 3   | 2   | 5   | 5   | 2   | 1   | 0   | 0   | 3   | 1   | 0   | 2   | 5   | 5   | 2   | 1   | 0   | 0   | 3   | 1   | 0   | 2   |     |
| +4  | 0  | 0  | 3  | 0  | 0  | 0  | 2  | 2  | 0  | 6   | 0   | 2   | 5   | 2   | 5   | 1   | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 4   | 0   | 2   | 0   | 2   | 2   | 5   | 5   | 2   | 2   | 4   | 0   | 2   | 0   | 2   | 2   | 5   | 5   |     |
| +5  | 0  | 10 | 4  | 0  | 0  | 5  | 2  | 0  | 0  | 0   | 0   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 1   | 0   | 0   | 2   | 0   | 5   | 1   | 0   | 2   | 1   | 0   | 2   | 1   | 0   | 5   | 1   | 0   | 2   | 1   | 0   | 2   | 1   |     |
| +6  | 2  | 4  | 0  | 0  | 5  | 0  | 1  | 2  | 2  | 1   | 4   | 10  | 10  | 2   | 5   | 5   | 0   | 5   | 0   | 0   | 10  | 0   | 0   | 4   | 0   | 10  | 1   | 1   | 0   | 10  | 0   | 0   | 4   | 0   | 10  | 1   | 1   | 1   |     |     |
| +7  | 10 | 0  | 5  | 0  | 2  | 1  | 0  | 10 | 10 | 5   | 10  | 10  | 6   | 0   | 0   | 10  | 2   | 1   | 10  | 1   | 5   | 5   | 2   | 3   | 5   | 0   | 2   | 0   | 1   | 3   | 5   | 5   | 2   | 3   | 5   | 0   | 2   | 0   | 1   | 3   |
| +8  | 5  | 0  | 5  | 2  | 0  | 2  | 10 | 0  | 1  | 3   | 5   | 0   | 0   | 0   | 2   | 4   | 5   | 2   | 10  | 6   | 0   | 5   | 5   | 2   | 5   | 0   | 5   | 5   | 0   | 2   | 0   | 5   | 5   | 2   | 5   | 0   | 5   | 5   | 0   | 2   |
| +9  | 0  | 2  | 5  | 2  | 0  | 2  | 10 | 1  | 0  | 10  | 2   | 1   | 5   | 2   | 0   | 3   | 0   | 2   | 0   | 0   | 4   | 0   | 5   | 2   | 0   | 5   | 2   | 2   | 5   | 2   | 4   | 0   | 5   | 2   | 0   | 5   | 2   | 5   | 2   |     |
| +10 | 5  | 2  | 1  | 0  | 0  | 1  | 5  | 3  | 10 | 0   | 5   | 5   | 6   | 0   | 1   | 5   | 5   | 0   | 5   | 2   | 3   | 5   | 0   | 5   | 2   | 10  | 1   | 5   | 2   | 3   | 5   | 0   | 5   | 2   | 10  | 10  | 1   | 5   | 2   |     |
| +11 | 2  | 1  | 4  | 6  | 0  | 4  | 10 | 5  | 2  | 5   | 0   | 0   | 0   | 1   | 2   | 1   | 0   | 2   | 0   | 0   | 0   | 6   | 6   | 0   | 4   | 5   | 3   | 2   | 2   | 10  | 0   | 6   | 6   | 0   | 4   | 5   | 3   | 2   | 2   | 10  |
| +12 | 5  | 0  | 1  | 0  | 2  | 10 | 10 | 0  | 1  | 5   | 0   | 0   | 5   | 5   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 4   | 5   | 10  | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 4   | 5   | 10  | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   |     |
| +13 | 0  | 5  | 0  | 2  | 0  | 10 | 6  | 0  | 5  | 6   | 0   | 5   | 0   | 2   | 0   | 4   | 2   | 2   | 1   | 0   | 6   | 2   | 1   | 5   | 5   | 0   | 0   | 1   | 5   | 5   | 6   | 2   | 1   | 5   | 5   | 0   | 0   | 1   | 5   | 5   |
| +14 | 0  | 0  | 4  | 5  | 0  | 2  | 0  | 0  | 2  | 0   | 1   | 5   | 2   | 0   | 2   | 1   | 0   | 5   | 3   | 10  | 0   | 0   | 4   | 2   | 0   | 0   | 4   | 2   | 5   | 5   | 0   | 0   | 4   | 2   | 0   | 0   | 4   | 2   | 5   | 5   |
| +15 | 2  | 0  | 0  | 2  | 0  | 5  | 0  | 2  | 0  | 1   | 2   | 2   | 0   | 2   | 0   | 4   | 5   | 1   | 0   | 1   | 0   | 5   | 0   | 2   | 0   | 0   | 5   | 1   | 1   | 0   | 0   | 5   | 0   | 2   | 0   | 5   | 1   | 1   | 0   |     |
| +16 | 0  | 4  | 5  | 0  | 5  | 10 | 4  | 3  | 5  | 1   | 0   | 4   | 1   | 4   | 0   | 0   | 3   | 0   | 2   | 2   | 0   | 2   | 0   | 5   | 0   | 5   | 2   | 5   | 10  | 2   | 0   | 2   | 0   | 5   | 0   | 5   | 2   | 5   | 10  |     |
| +17 | 5  | 0  | 0  | 1  | 2  | 0  | 2  | 5  | 0  | 5   | 0   | 0   | 2   | 0   | 5   | 0   | 0   | 2   | 2   | 0   | 0   | 6   | 5   | 3   | 5   | 0   | 0   | 5   | 1   | 0   | 0   | 6   | 5   | 3   | 5   | 0   | 5   | 1   | 0   |     |
| +18 | 6  | 2  | 6  | 1  | 1  | 5  | 1  | 2  | 2  | 0   | 2   | 2   | 5   | 1   | 3   | 2   | 0   | 5   | 1   | 2   | 10  | 10  | 4   | 0   | 0   | 5   | 1   | 0   | 2   | 10  | 10  | 4   | 0   | 0   | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| +19 | 3  | 0  | 3  | 1  | 0  | 0  | 10 | 10 | 0  | 5   | 0   | 0   | 1   | 3   | 0   | 0   | 2   | 5   | 0   | 0   | 5   | 5   | 1   | 0   | 5   | 2   | 1   | 2   | 10  | 10  | 5   | 5   | 1   | 0   | 5   | 2   | 1   | 2   | 10  |     |
| +20 | 0  | 1  | 2  | 1  | 0  | 0  | 1  | 6  | 0  | 2   | 0   | 2   | 0   | 10  | 1   | 2   | 0   | 1   | 0   | 0   | 5   | 2   | 1   | 3   | 1   | 5   | 6   | 5   | 5   | 3   | 5   | 2   | 1   | 3   | 1   | 5   | 6   | 5   | 3   |     |
| +21 | 1  | 6  | 5  | 2  | 2  | 0  | 5  | 0  | 4  | 3   | 0   | 0   | 6   | 0   | 0   | 2   | 0   | 2   | 5   | 5   | 0   | 4   | 0   | 1   | 0   | 0   | 5   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 3   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   |     |
| +22 | 10 | 1  | 5  | 2  | 0  | 10 | 5  | 5  | 0  | 5   | 6   | 4   | 2   | 0   | 5   | 0   | 0   | 10  | 5   | 2   | 4   | 0   | 5   | 0   | 4   | 4   | 5   | 0   | 2   | 5   | 0   | 2   | 0   | 0   | 0   | 1   | 10  | 3   | 0   | 2   |
| +23 | 0  | 0  | 2  | 4  | 5  | 0  | 2  | 5  | 5  | 0   | 6   | 5   | 1   | 4   | 0   | 2   | 6   | 10  | 1   | 1   | 0   | 5   | 0   | 4   | 4   | 1   | 0   | 2   | 2   | 0   | 3   | 0   | 3   | 0   | 1   | 1   | 5   | 0   | 3   |     |
| +24 | 10 | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 3  | 2  | 2  | 5   | 0   | 10  | 5   | 2   | 2   | 0   | 5   | 4   | 0   | 3   | 1   | 0   | 0   | 0   | 5   | 5   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 4   | 0   | 0   | 1   | 0   | 7   | 0   | 4   |     |
| +25 | 2  | 2  | 0  | 2  | 0  | 0  | 5  | 5  | 6  | 0   | 4   | 1   | 5   | 0   | 0   | 5   | 3   | 0   | 5   | 1   | 0   | 4   | 5   | 0   | 1   | 0   | 10  | 1   | 0   | 5   | 0   | 3   | 0   | 1   | 2   | 9   | 0   | 5   |     |     |
| +26 | 1  | 2  | 0  | 0  | 2  | 4  | 0  | 0  | 5  | 10  | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 5   | 0   | 2   | 5   | 0   | 4   | 5   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 6   | 0   | 0   | 1   | 5   | 0   | 0   | 6   |     |     |
| +27 | 1  | 5  | 3  | 2  | 1  | 0  | 2  | 5  | 2  | 10  | 3   | 0   | 0   | 4   | 5   | 5   | 0   | 5   | 1   | 6   | 0   | 5   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 10  | 9   | 7   | 6   | 5   | 1   | 3   | 2   | 1   |     |
| +28 | 1  | 1  | 2  | 0  | 10 | 0  | 5  | 2  | 1  | 2   | 0   | 1   | 2   | 1   | 2   | 0   | 0   | 2   | 5   | 5   | 0   | 0   | 2   | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| +29 | 0  | 10 | 0  | 5  | 2  | 1  | 1  | 0  | 5  | 2   | 2   | 0   | 5   | 5   | 1   | 5   | 5   | 0   | 10  | 5   | 0   | 2   | 2   | 0   | 1   | 0   | 0   | 2   | 0   | 2   | 0   | 5   | 1   | 2   | 0   | 5   | 4   | 7   | 6   | 3   |
| +30 | 1  | 5  | 2  | 5  | 1  | 1  | 3  | 2  | 5  | 2   | 10  | 1   | 5   | 5   | 0   | 10  | 1   | 0   | 10  | 3   | 0   | 5   | 2   | 0   | 0   | 0   | 10  | 2   | 2   | 0   | 1   | 0   | 0   | 5   | 6   | 7   | 0   | 9   | 0   |     |
| +31 | 1  | 6  | 5  | 2  | 2  | 0  | 5  | 0  | 4  | 3   | 0   | 0   | 6   | 0   | 0   | 2   | 0   | 2   | 5   | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 2   | 3   | 0   | 5   | 6   | 7   | 0   | 9   |     |
| +32 | 10 | 1  | 5  | 2  | 0  | 10 | 5  | 5  | 0  | 5   | 6   | 4   | 2   | 0   | 5   | 0   | 0   | 10  | 5   | 2   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 5   | 2   | 0   | 4   | 1   | 5   | 0   | 2   | 1   | 0   | 5   | 2   |
| +33 | 0  | 2  | 4  | 5  | 0  | 2  | 5  | 5  | 0  | 6   | 5   | 1   | 4   | 0   | 2   | 6   | 10  | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 7   | 5   | 1   | 3   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 2   | 0   | 2   | 9   | 3   |     |
| +34 | 10 | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 3  | 2  | 2  | 5   | 0   | 10  | 5   | 2   | 2   | 0   | 5   | 4   | 0   | 3   | 3   | 0   | 3   | 0   | 6   | 6   | 2   | 4   | 1   | 5   | 9   | 0   | 0   | 0   | 2   | 5   | 0   | 7   | 4   |     |
| +35 | 2  | 2  | 0  | 2  | 0  | 0  | 5  | 5  | 0  | 2   | 4   | 1   | 5   | 0   | 0   | 5   | 3   | 0   | 5   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 5   | 7   | 8   | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 0   | 1   | 5   | 5   |     |
| +36 | 1  | 2  | 0  | 0  | 2  | 4  | 0  | 0  | 5  | 10  | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 5   | 0   | 5   | 2   | 5   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 8   | 5   | 6   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 0   | 1   | 0   | 3   | 6   |
| +37 | 1  | 5  | 3  | 2  | 1  | 0  | 2  | 5  | 2  | 10  | 3   | 0   | 0   | 4   | 5   | 5   | 0   | 5   | 1   | 6   | 0   | 10  | 1   | 0   | 2   | 5   | 3   | 9   | 4   | 7   | 0   | 1   | 0   | 5   | 0   | 1   | 0   | 2   | 4   | 7   |
| +38 | 1  | 1  | 2  | 0  | 10 | 0  | 5  | 2  | 1  | 2   | 0   | 1   | 2   | 1   | 2   | 0   | 0   | 2   | 5   | 1   | 3   | 5   | 7   | 9   | 0   | 2   | 0   | 7   | 8   | 0   | 0   | 2   | 0   | 1   | 0   | 2   | 0   | 1   | 8   |     |
| +39 | 0  | 10 | 0  | 5  | 2  | 1  | 1  | 0  | 5  | 5   | 2   | 0   | 5   | 5   | 1   | 5   | 5   | 0   | 10  | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 6   | 9   | 1   | 5   | 9   | 7   | 5   | 3   | 4   | 1   | 0   | 9   |     |
| +40 | 1  | 5  | 2  | 5  | 1  | 1  | 3  | 2  | 2  | 2   | 10  | 1   | 5   | 5   | 0   | 10  | 1   | 0   | 10  | 3   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 3   | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 0   |

## A.2 Características geométricas

A seguir encontram-se as dimensões de todos os departamentos (características geométricas), bem como os detalhes mais importantes para a compreensão dos testes realizados.

Tabela 8.10 Características geométricas – testes 1x1.

|     | Área | Orientação | Perda A. Morta [%] | R.Asp.Mín. | R.Asp.Máx. | Red.Máx.Área [%] | Área Mínima |
|-----|------|------------|--------------------|------------|------------|------------------|-------------|
| +1  | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +2  | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +3  | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +4  | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +5  | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +6  | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +7  | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +8  | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +9  | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +10 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +11 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +12 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +13 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +14 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +15 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +16 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +17 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +18 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +19 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +20 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +21 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +22 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +23 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +24 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +25 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +26 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +27 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +28 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +29 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +30 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +31 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +32 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +33 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +34 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +35 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +36 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +37 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +38 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +39 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +40 | 1    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |



Tabela 8.11 Características geométricas – testes - [TAM91].

|     | Área | Orientação | Perda A. Morta (%) | R.Asp.Mín. | R.Asp.Máx. | Red.Máx.Área (%) | Área Mínima |
|-----|------|------------|--------------------|------------|------------|------------------|-------------|
| +1  | 24   |            | 0                  | .8         | 1          | 0                |             |
| +2  | 16   |            | 0                  | .75        | 1,15       | 0                |             |
| +3  | 36   |            | 0                  | .6         | 1,85       | 0                |             |
| +4  | 8    |            | 0                  | .3         | 1,1        | 0                |             |
| +5  | 21   |            | 0                  | .9         | 1,18       | 0                |             |
| +6  | 17,5 |            | 0                  | .5         | 1          | 0                |             |
| +7  | 3,6  |            | 0                  | .3         | 1,4        | 0                |             |
| +8  | 15,4 |            | 0                  | .6         | 1,25       | 0                |             |
| +9  | 20   |            | 0                  | .9         | 1          | 0                |             |
| +10 | 19,5 |            | 0                  | 1,2        | 1,8        | 0                |             |
| +11 | 16   |            | 0                  | .85        | 1,1        | 0                |             |
| +12 | 9    |            | 0                  | .9         | 1          | 0                |             |
| +13 | 9    |            | 0                  | .8         | 1,1        | 0                |             |
| +14 | 25   |            | 0                  | .92        | 1,05       | 0                |             |
| +15 | 4    |            | 0                  | .85        | 1,15       | 0                |             |
| +16 | 3    |            | 0                  | .9         | 1          | 0                |             |
| +17 | 4    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +18 | 9    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +19 | 4,5  |            | 0                  | .7         | 1,1        | 0                |             |
| +20 | 5    |            | 0                  | .5         | 1,5        | 0                |             |
| +21 | 16   |            | 0                  | .85        | 1,1        | 0                |             |
| +22 | 9    |            | 0                  | .9         | 1          | 0                |             |
| +23 | 9    |            | 0                  | .8         | 1,1        | 0                |             |
| +24 | 25   |            | 0                  | .92        | 1,05       | 0                |             |
| +25 | 4    |            | 0                  | .85        | 1,15       | 0                |             |
| +26 | 3    |            | 0                  | .9         | 1          | 0                |             |
| +27 | 4    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +28 | 9    |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +29 | 4,5  |            | 0                  | .7         | 1,1        | 0                |             |
| +30 | 5    |            | 0                  | .5         | 1,5        | 0                |             |



# Anexo B

## Bateria de testes

Os layouts finais da primeira, segunda e terceira bateria de testes são apresentados a seguir.

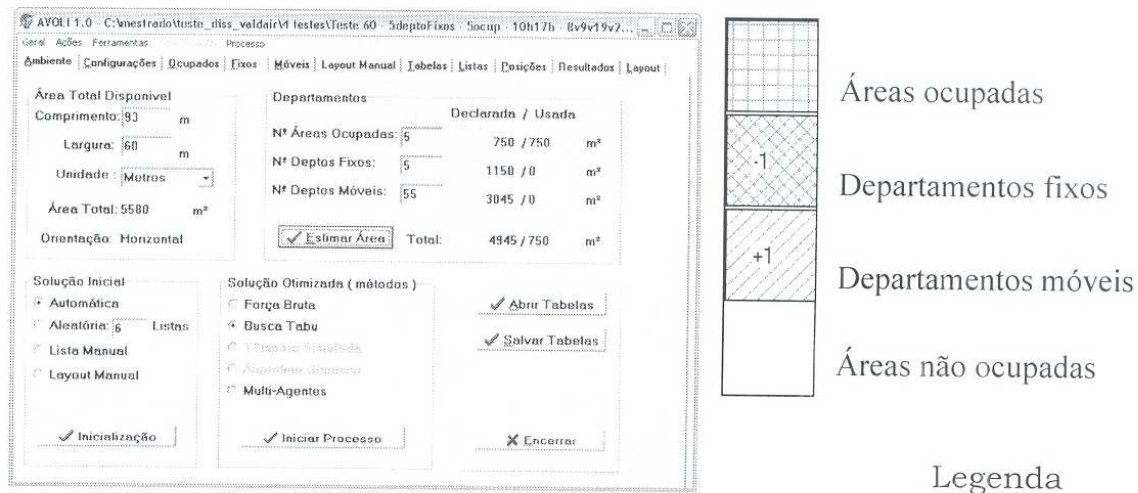


Figura 8.1 Área de trabalho do AVOLI.

## B.1 Layouts finais - Primeira bateria de testes

A seguir encontram-se os layouts finais da primeira bateria de testes. Todas as figuras foram geradas pelo software desenvolvido.

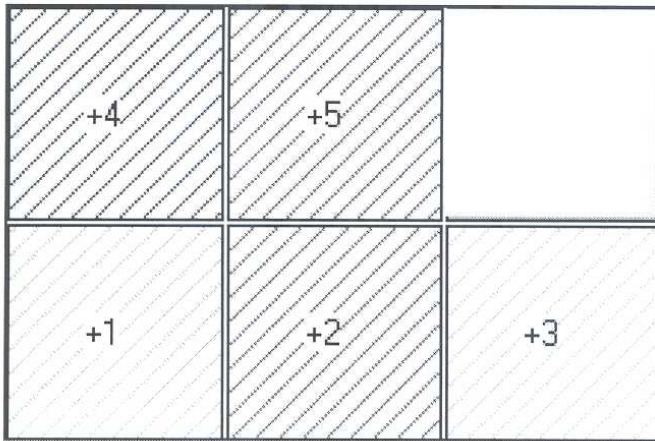


Figura 8.2 Layout final – teste 1x1 com 5 deptos.

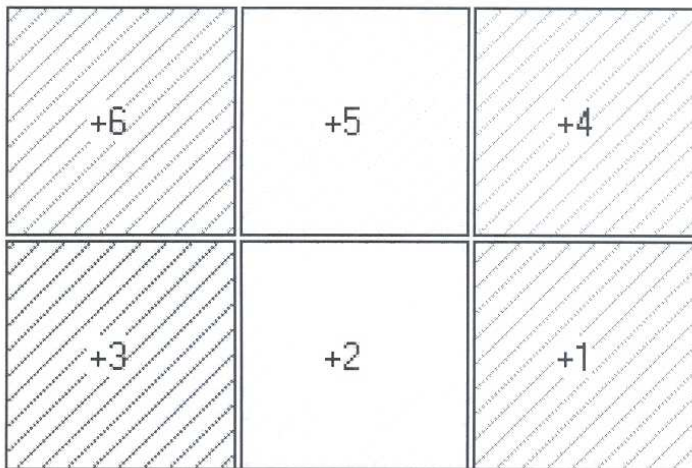


Figura 8.3 Layout final – teste 1x1 com 6 deptos.

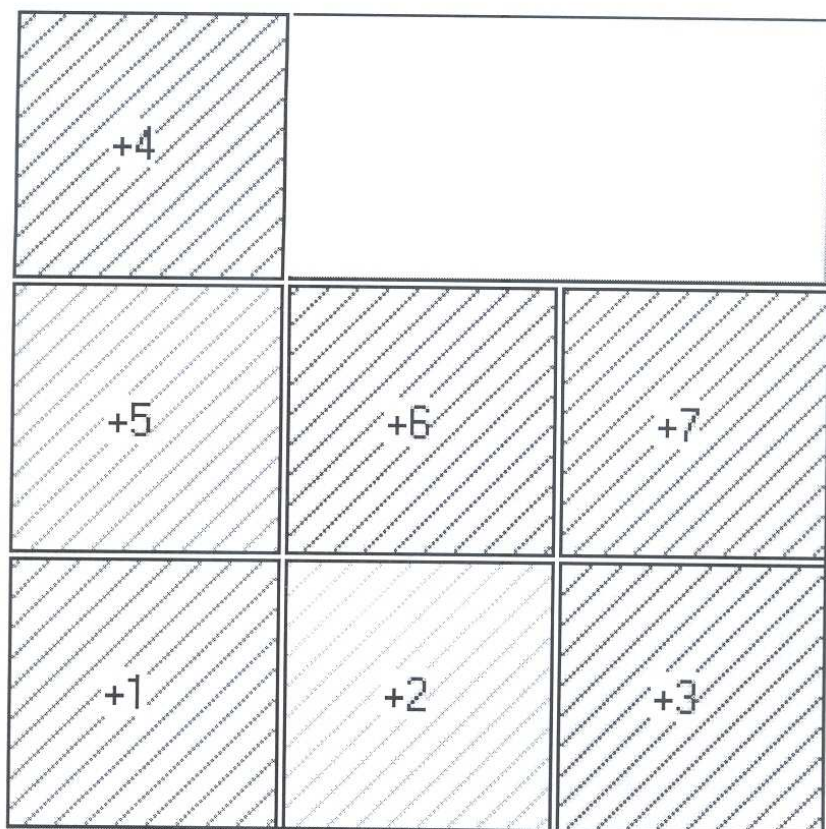


Figura 8.4 Layout final – teste 1x1 com 7 deptos.

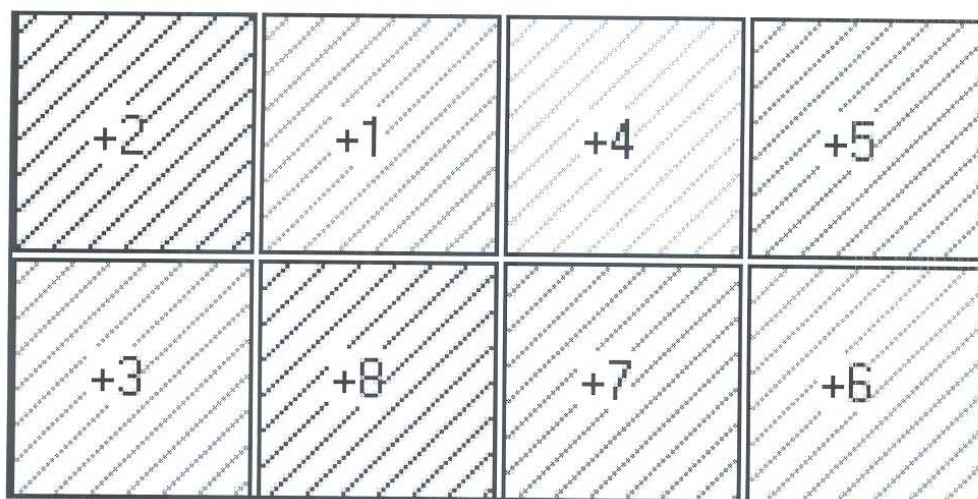


Figura 8.5 Layout final – teste 1x1 com 8 deptos.



|    |     |    |     |
|----|-----|----|-----|
| +2 | +10 | +6 | +5  |
| +1 | +11 | +8 | +4  |
| +3 | +9  | +7 | +12 |

Figura 8.6 Layout final – teste 1x1 com 12 deptos.

|     |     |     |    |     |
|-----|-----|-----|----|-----|
| +10 | +15 | +6  | +5 | +12 |
| +4  | +3  | +14 | +7 | +11 |
| +1  | +2  | +13 | +8 | +9  |

Figura 8.7 Layout final – teste 1x1 com 15 deptos.

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| +9  | +3  | +10 | +14 | +18 |
| +16 | +11 | +12 | +2  | +4  |
| +13 | +8  | +20 | +15 | +19 |
| +6  | +1  | +7  | +5  | +17 |

Figura 8.8 Layout final – teste 1x1 com 20 deptos.

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| +15 | +17 | +1  | +24 | +12 |
| +23 | +18 | +22 | +26 | +6  |
| +11 | +8  | +7  | +10 | +25 |
| +30 | +16 | +19 | +9  | +13 |
| +4  | +27 | +3  | +21 | +28 |
| +14 | +20 | +29 | +2  | +5  |

Figura 8.9 Layout final – teste 1x1 com 30 deptos.



|     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| +26 | +24 | +12 | +1  | +32 | +6  | +22 | +15 |
| +17 | +35 | +7  | +25 | +28 | +11 | +8  | +23 |
| +36 | +29 | +10 | +19 | +40 | +16 | +37 | +38 |
| +2  | +13 | +39 | +34 | +27 | +30 | +20 | +14 |
| +5  | +21 | +9  | +31 | +33 | +3  | +18 | +4  |

Figura 8.10 Layout final – teste 1x1 com 40 deptos.



## B.2 Layouts finais - Segunda bateria de testes

A seguir encontram-se os layouts finais da segunda bateria de testes. Todas as figuras foram geradas pelo software desenvolvido.

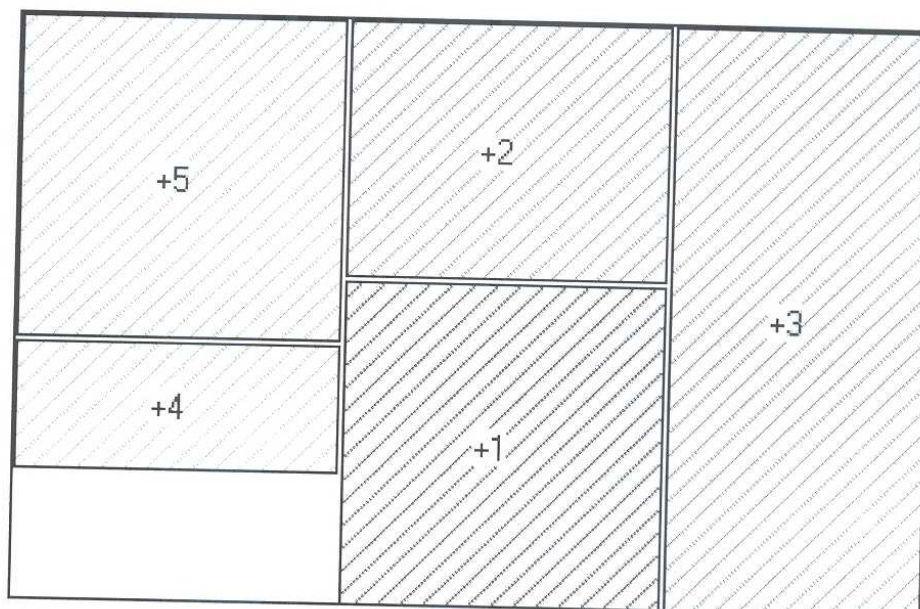


Figura 8.11 Layout final - teste com 5 deptos.

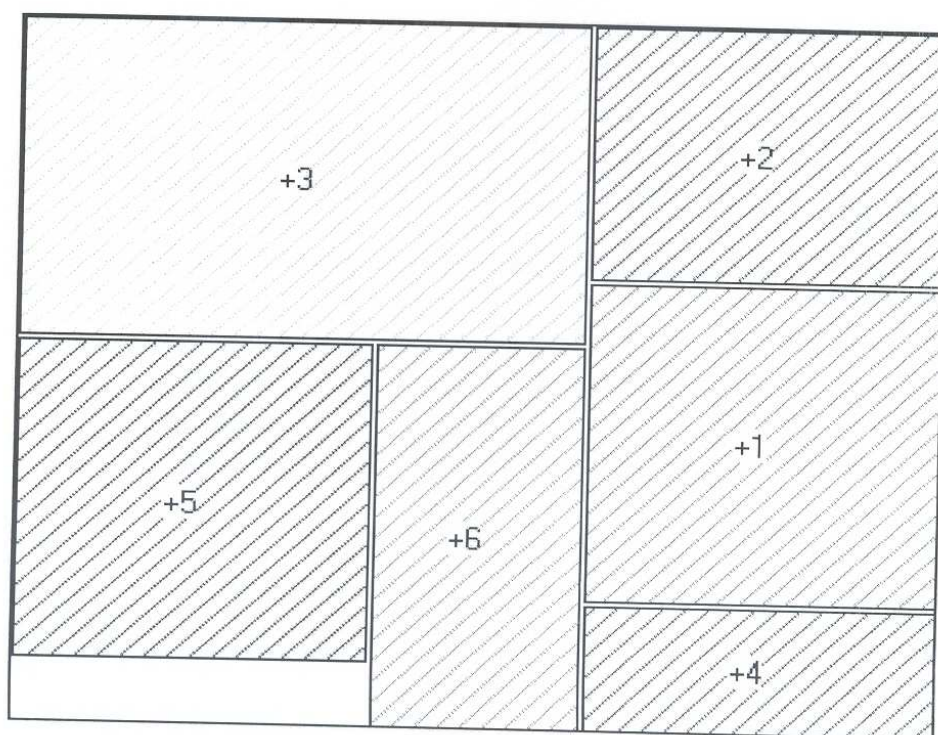


Figura 8.12 Layout final - teste com 6 deptos.

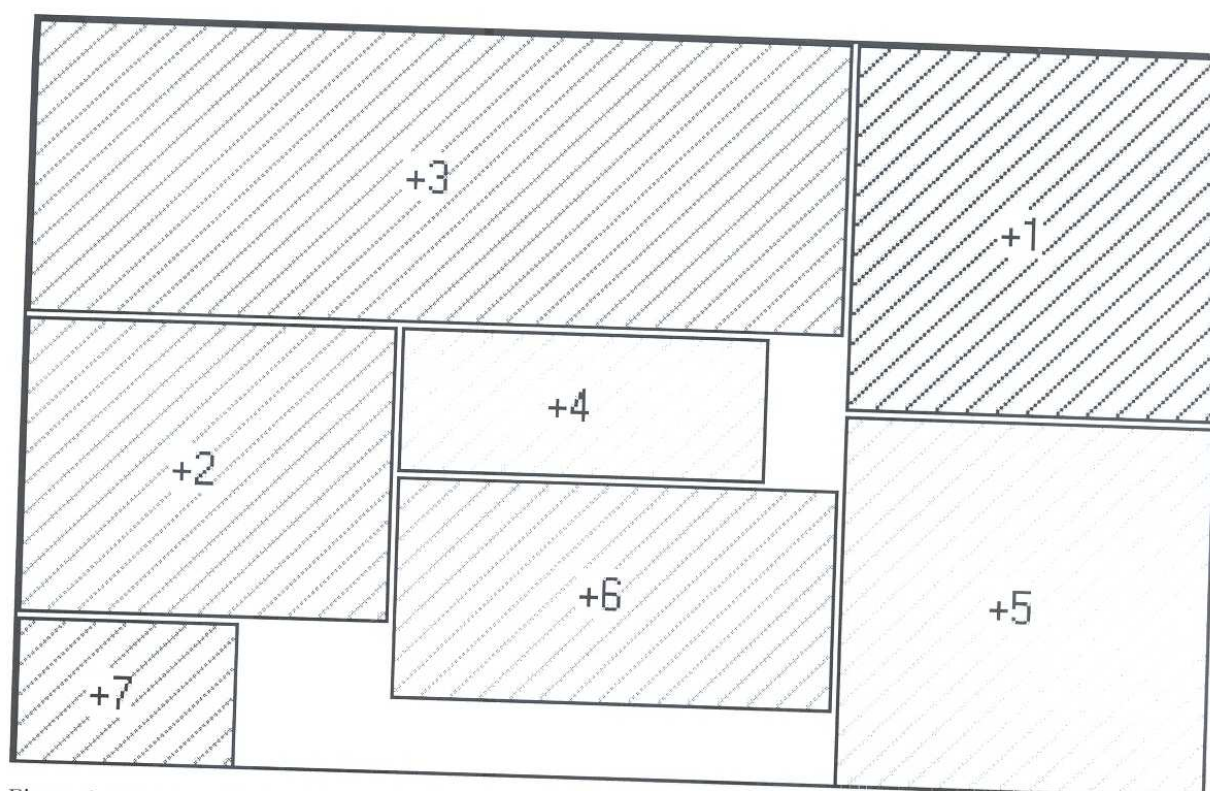


Figura 8.13 Layout final - teste com 7 deptos.



Figura 8.14 Layout final - teste com 8 deptos.



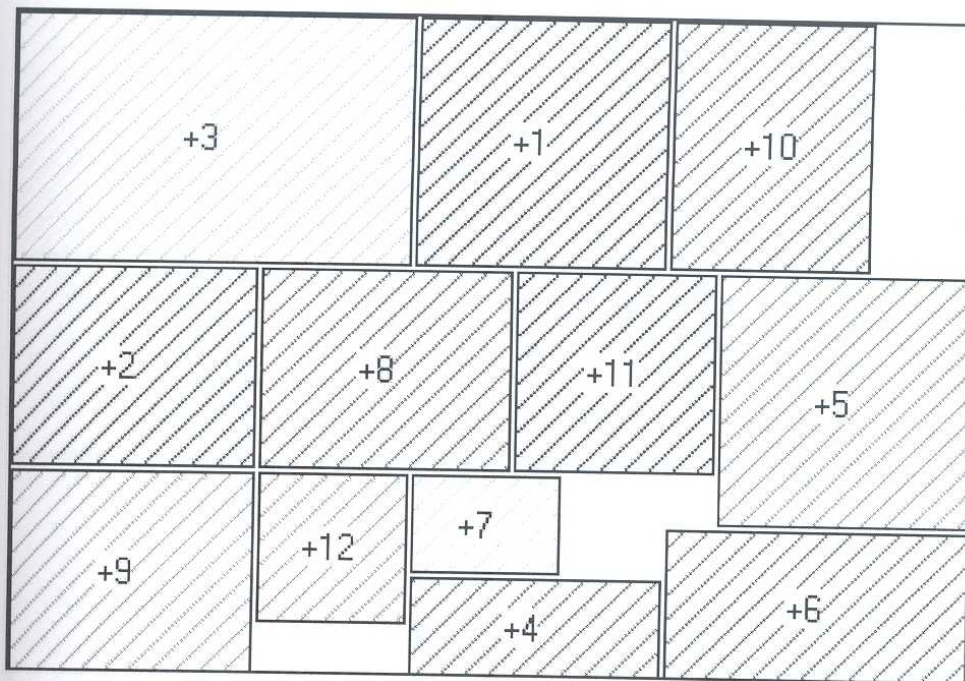


Figura 8.15 Layout final - teste com 12 deptos.

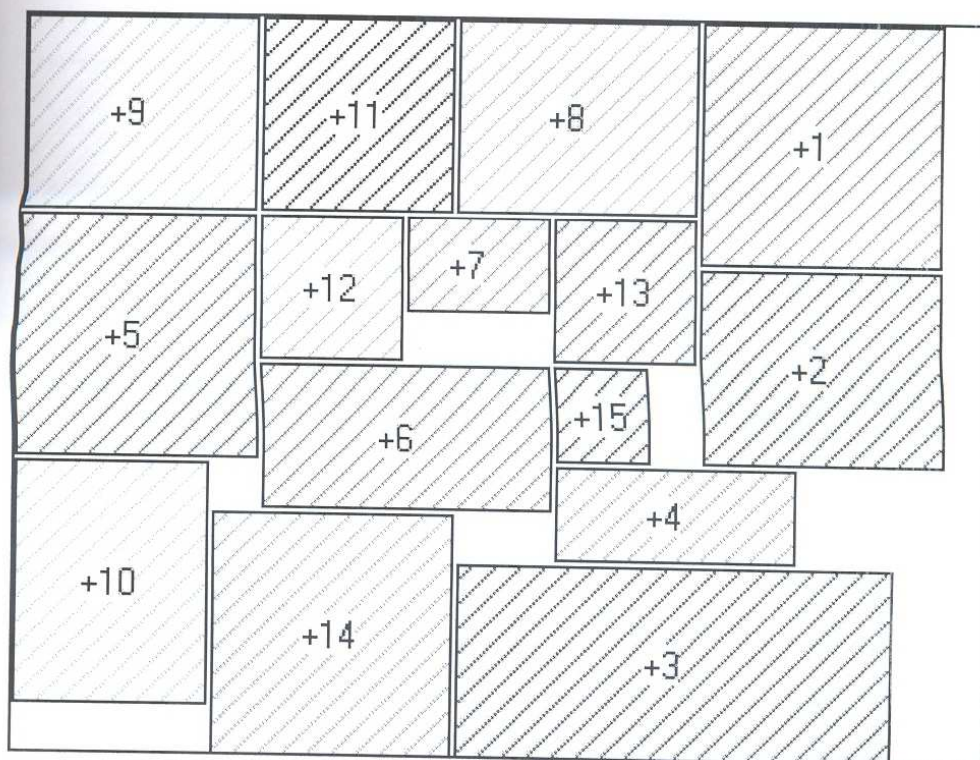


Figura 8.16 Layout final - teste com 15 deptos.

Este quadro externo pode ser ajustado para um valor menor após a otimização



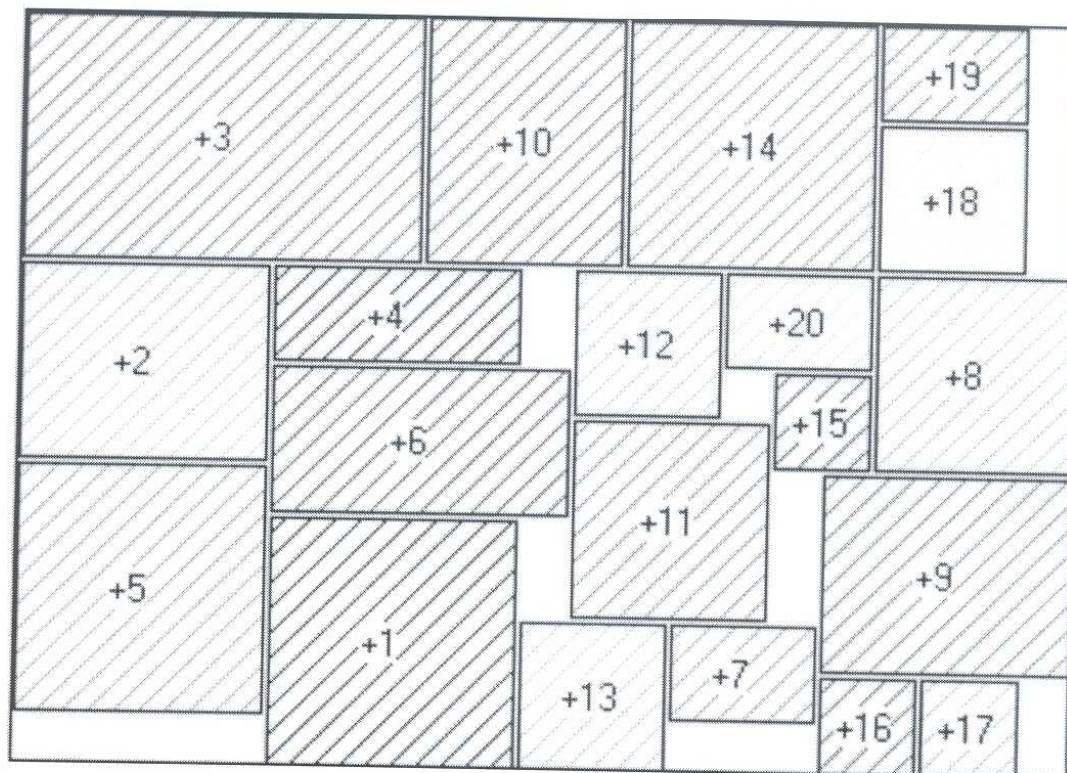


Figura 8.17 Layout final - teste com 20 deptos.

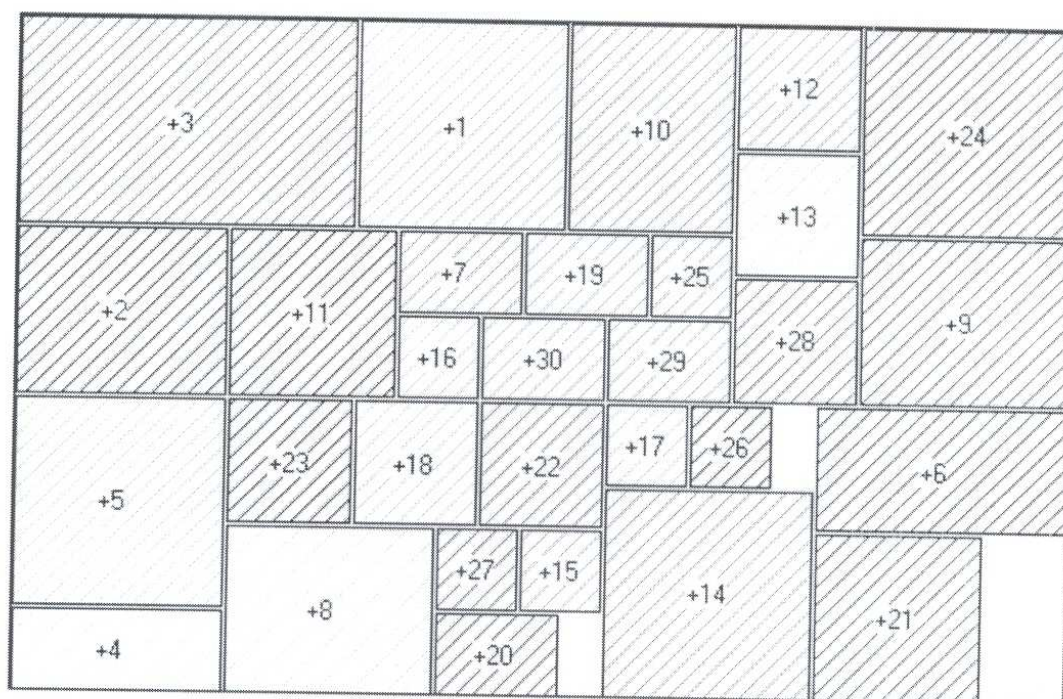


Figura 8.18 Layout final - teste com 30 deptos.

### B.3 Layouts finais - Terceira bateria de testes

A seguir encontram-se os layouts finais da terceira bateria de testes (layouts das melhores soluções encontradas). Todas as figuras foram geradas pelo software desenvolvido.

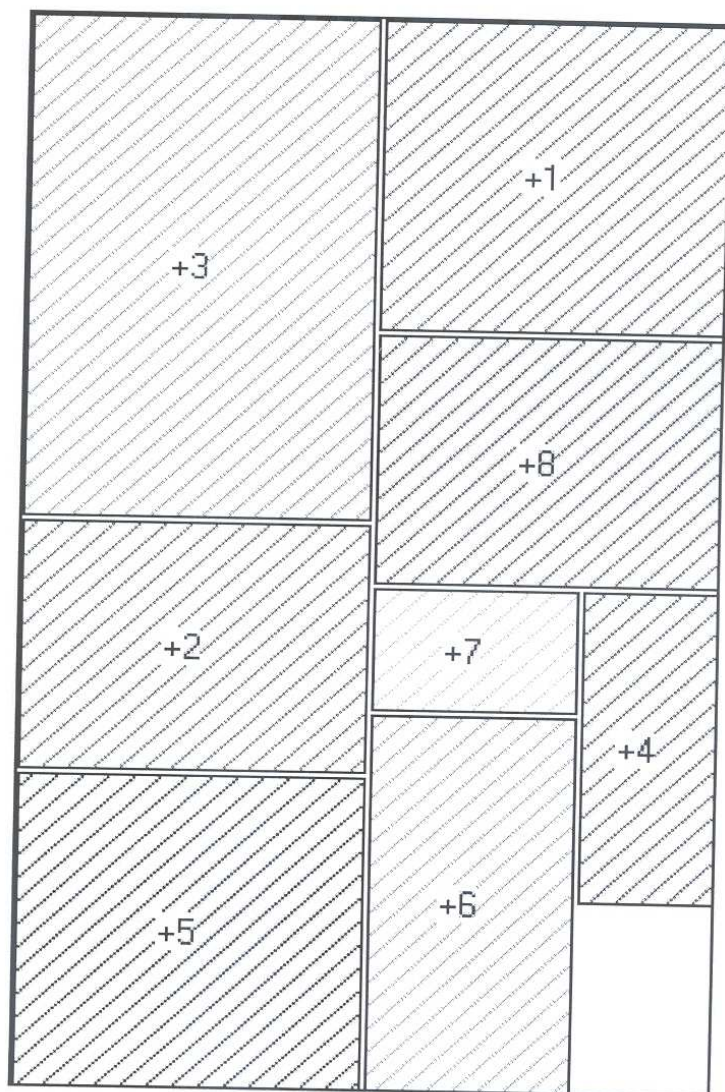


Figura 8.19 Layout final - teste com 8 deptos.

O departamento 3 e o departamento 4 devem ficar na vertical, enquanto que o departamento 7 deve ficar na horizontal.



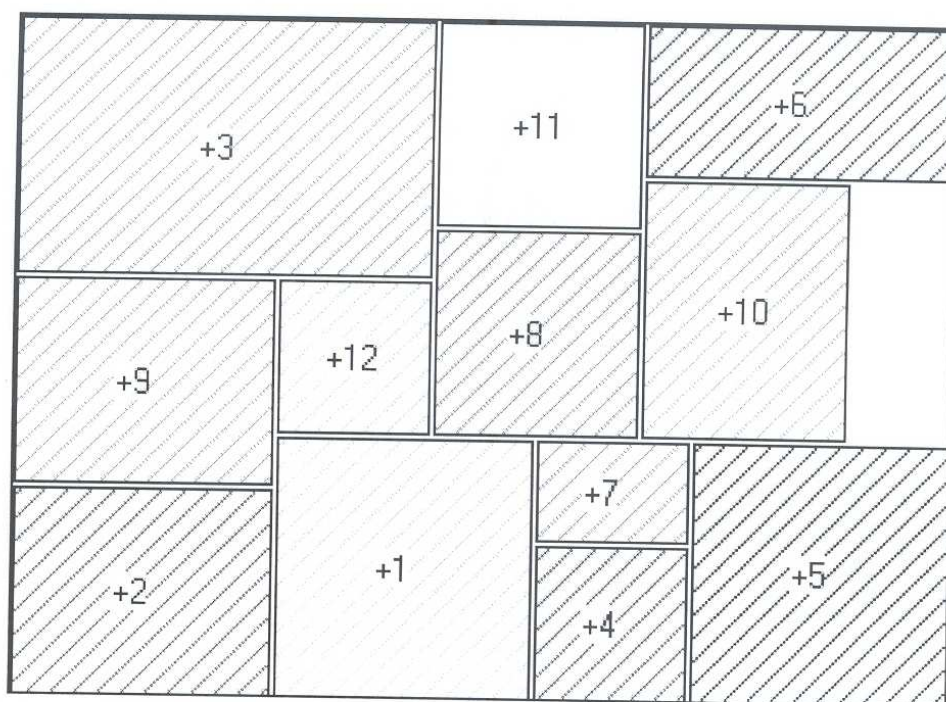


Figura 8.20 Layout final - teste com 12 deptos.

O departamento 7 deve ficar na horizontal, o departamento 10 na vertical, o departamento 1 deve ficar perto do departamento 7, o departamento 3 deve ficar perto do departamento 11, o departamento 3 deve ficar longe do departamento 4.

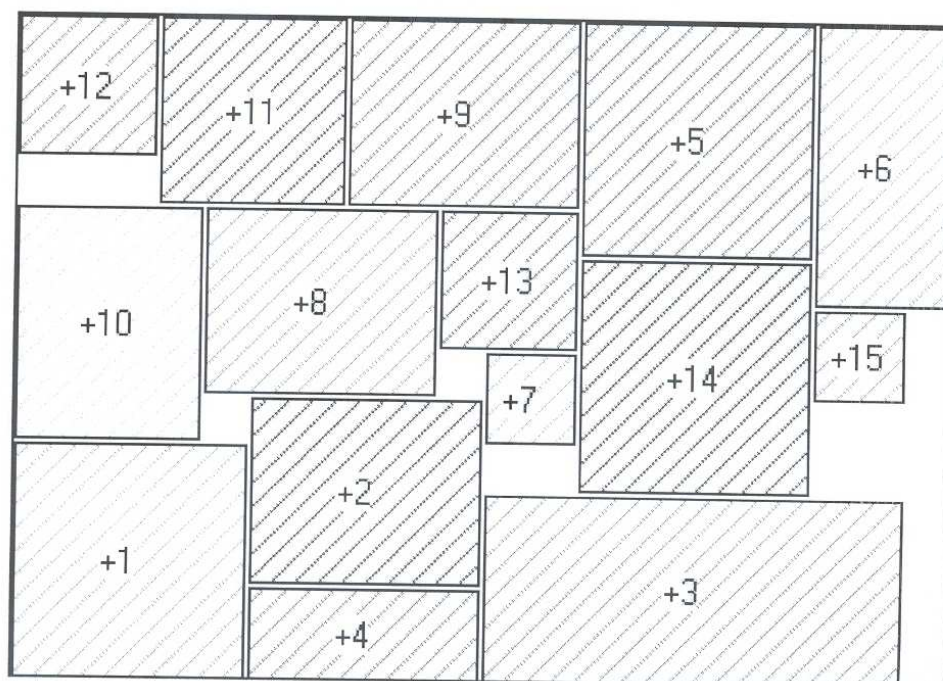


Figura 8.21 Layout final - teste com 15 deptos.

O departamento 6 deve ficar na vertical, o departamento 4 deve ficar longe do departamento 10 e longe do departamento 15 também, o departamento 10 deve ficar longe do departamento 15.



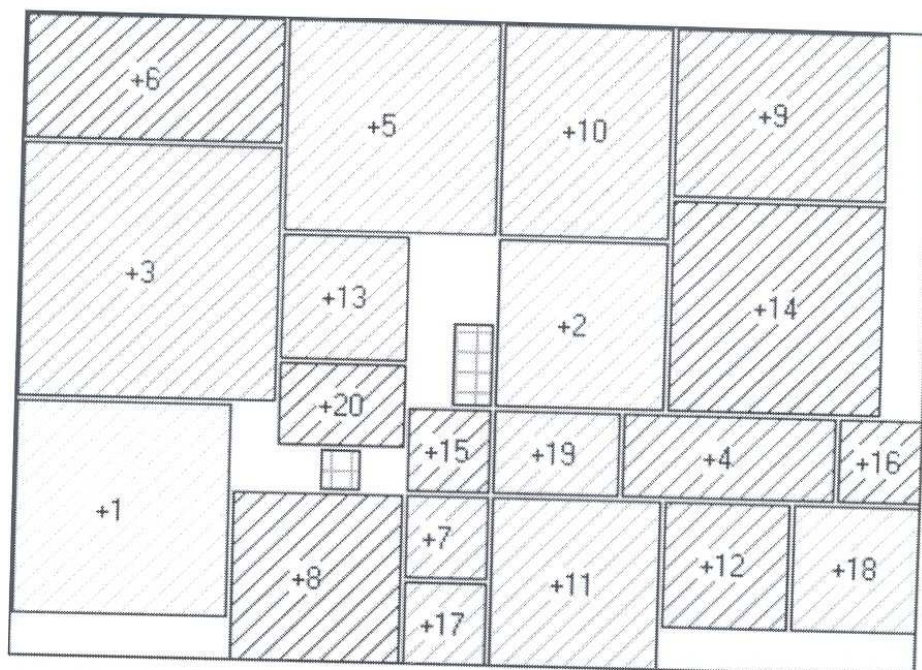


Figura 8.22 Layout final - teste com 20 deptos.

O departamento 7 deve ficar na horizontal, o 8 na vertical, o departamento 14 deve ficar longe do departamento 8, o departamento 3 deve ficar perto do departamento 13 e possui 2 áreas ocupadas.

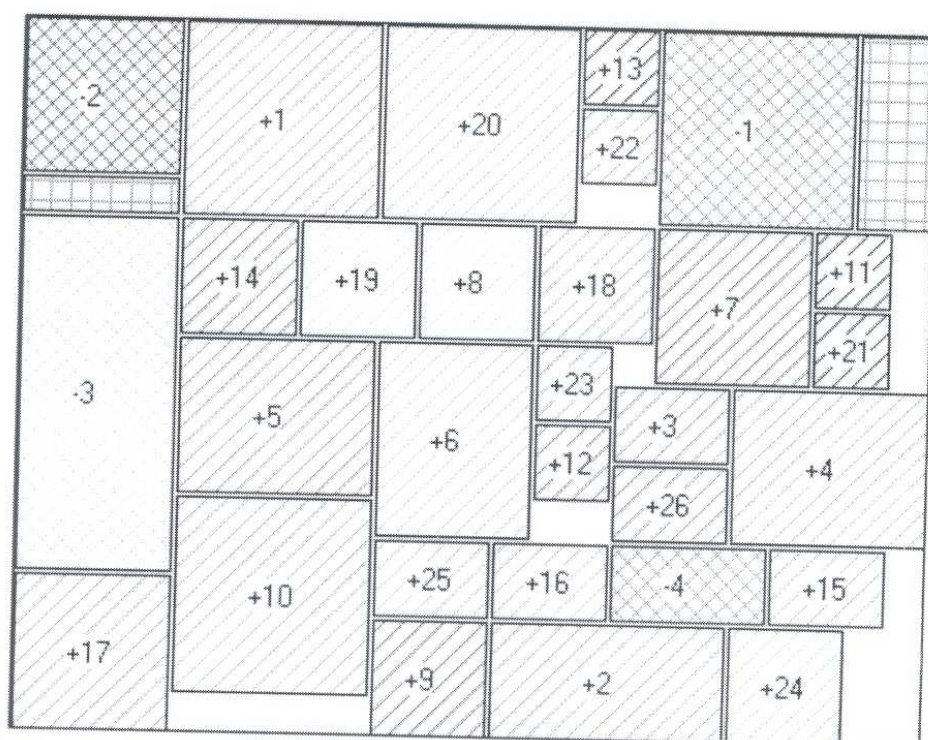


Figura 8.23 Layout final - teste com 30 deptos.

O departamento 2 deve ficar na horizontal, o departamento 6 deve ficar na vertical, o departamento 16 deve ficar longe do departamento 21, o departamento 1 deve ficar perto do departamento 20, possui 2 áreas ocupadas e 4 departamentos fixos. São chamados de departamentos fixos os departamentos previamente atribuídos a localizações específicas dentro do layout.

## Anexo C

### Problemas propostos

Para validar o sistema desenvolvido executou-se os procedimentos em uma nova bateria de testes. Dois novos problemas foram propostos. Todos os detalhes dos dois problemas propostos estão a seguir discriminados, bem como, os layouts finais da quarta bateria de testes. Todas as figuras foram geradas pelo software desenvolvido.

#### C.1 Teste com 40 departamentos

##### C.1.1 Características geométricas

###### *Áreas ocupadas no interior da planta.*

Neste teste tem-se três áreas ocupadas e identificadas sequencialmente pelos números 1, 2 e 3. Para identifica-las no interior da planta, é necessário informar as coordenadas (Xinício,Yinício) e as dimensões (Largura x Comprimento) de cada área, conforme tabela 8.12.

Tabela 8.12. Áreas ocupadas para 40 departamentos

| <u>Ocupados</u> |         |         |         |             |
|-----------------|---------|---------|---------|-------------|
|                 | Xinício | Yinício | Largura | Comprimento |
| 1               | 40      | 19      | 8       | 3           |
| 2               | 43      | 24      | 3       | 10          |
| 3               | 59      | 1       | 12      | 2           |



**Características geométricas dos departamentos móveis.**

Este teste possui 40 departamentos identificados sequencialmente pelos números +1, +2, +3, ..., +40. Para que o sistema possa atribuí-los à planta, é necessário informar a área, a orientação, o quanto de área o departamento pode perder para as áreas ocupadas, as razões de aspectos e a redução máxima de área permitida para cada departamento. O campo “Área mínima” é um campo de saída de dados. Neste campo o sistema informa qual é a área mínima necessária para se alocar o departamento em questão. A tabela 8.13 mostra todas as informações necessárias que o sistema precisa sobre os departamentos. O sinal “+” identifica departamentos do tipo “móveis”.

Tabela 8.13. Características geométricas para 40 departamentos

| Móveis |      |            |                    |            |            |                  |             |
|--------|------|------------|--------------------|------------|------------|------------------|-------------|
|        | Área | Orientação | Perda A. Morta [%] | R.Asp.Mín. | R.Asp.Máx. | Red.Máx.Área [%] | Área Mínima |
| +1     | 100  |            | 0                  | 0,7        | 1          | 0                |             |
| +2     | 80   |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +3     | 50   |            | 0                  | 0,7        | 1,3        | 0                |             |
| +4     | 60   | h          | 0                  | 0,5        | 0,8        | 0                |             |
| +5     | 120  |            | 0                  | 0,9        | 1          | 0                |             |
| +6     | 40   |            | 0                  | 0,6        | 1          | 0                |             |
| +7     | 20   |            | 0                  | 0,7        | 1,4        | 0                |             |
| +8     | 40   | v          | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +9     | 150  |            | 0                  | 0,8        | 1,1        | 0                |             |
| +10    | 120  | h          | 0                  | 0,5        | 1,5        | 0                |             |
| +11    | 50   |            | 0                  | 0,7        | 1,1        | 0                |             |
| +12    | 10   |            | 0                  | 0,8        | 1,2        | 0                |             |
| +13    | 20   |            | 0                  | 0,95       | 1,5        | 0                |             |
| +14    | 30   |            | 0                  | 0,75       | 1,25       | 0                |             |
| +15    | 50   |            | 0                  | 0,9        | 1,1        | 0                |             |
| +16    | 20   |            | 0                  | 0,8        | 1,5        | 0                |             |
| +17    | 40   | h          | 0                  | 0,4        | 1,4        | 0                |             |
| +18    | 20   |            | 0                  | 0,9        | 1,9        | 0                |             |
| +19    | 80   | v          | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +20    | 100  |            | 0                  | 0,95       | 1,15       | 0                |             |
| +21    | 40   |            | 0                  | 0,5        | 1,5        | 0                |             |
| +22    | 50   |            | 0                  | 1          | 1,1        | 0                |             |
| +23    | 80   |            | 0                  | 0,6        | 1          | 0                |             |
| +24    | 10   |            | 0                  | 0,9        | 1          | 0                |             |
| +25    | 40   |            | 0                  | 0,8        | 1,1        | 0                |             |
| +26    | 10   |            | 0                  | 0,5        | 1,2        | 0                |             |
| +27    | 40   |            | 0                  | 0,8        | 1          | 0                |             |
| +28    | 10   |            | 0                  | 0,5        | 1,3        | 0                |             |
| +29    | 80   | v          | 0                  | ,7         | 1,05       | 0                |             |
| +30    | 40   |            | 0                  | 0,9        | 1,1        | 0                |             |
| +31    | 40   |            | 0                  | ,9         | 1,2        | 0                |             |
| +32    | 80   |            | 0                  | ,9         | 1,5        | 0                |             |
| +33    | 10   |            | 0                  | ,9         | 1,1        | 0                |             |
| +34    | 40   |            | 0                  | ,8         | 1          | 0                |             |
| +35    | 10   |            | 0                  | ,8         | 1,3        | 0                |             |
| +36    | 50   |            | 0                  | ,8         | 1,2        | 0                |             |
| +37    | 20   |            | 0                  | ,8         | 1,5        | 0                |             |
| +38    | 40   |            | 0                  | ,9         | 1,6        | 0                |             |
| +39    | 50   |            | 0                  | ,9         | 1,1        | 0                |             |
| +40    | 60   |            | 0                  | 1          | 1,8        | 0                |             |



## C.1.2 Matriz de fluxos

Esta matriz é simétrica e representa o fluxo (volume de tráfego) entre cada par de departamentos. A tabela 8.14 mostra esta matriz.

Tabela 8.14. Matriz de fluxo – 40 departamentos

|    | 1  | 2  | 3 | 4 | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
|----|----|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 0  | 3  | 2 | 0 | 0  | 2  | 10 | 5  | 0  | 5  | 2  | 5  | 0  | 0  | 2  | 0  | 5  | 6  | 3  | 0  | 1  | 10 | 0  | 10 | 2  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 8  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 2  | 3  | 0  | 4 | 0 | 10 | 4  | 0  | 0  | 2  | 2  | 1  | 0  | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 1  | 6  | 1  | 0  | 1  | 2  | 2  | 5  | 1  | 10 | 5  | 2  | 4  | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  |
| 3  | 2  | 4  | 0 | 3 | 4  | 0  | 5  | 5  | 5  | 1  | 4  | 1  | 0  | 4  | 0  | 4  | 0  | 6  | 3  | 2  | 5  | 5  | 2  | 1  | 0  | 0  | 3  | 1  | 0  | 2  | 3  | 7  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 3  |
| 4  | 0  | 0  | 3 | 0 | 0  | 0  | 2  | 2  | 0  | 6  | 0  | 2  | 5  | 2  | 5  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 4  | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 5  | 5  | 4  | 8  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |    |
| 5  | 0  | 10 | 4 | 0 | 0  | 5  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 1  | 0  | 0  | 2  | 0  | 5  | 1  | 0  | 2  | 1  | 0  | 2  | 1  | 5  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  |    |
| 6  | 2  | 4  | 0 | 0 | 5  | 0  | 1  | 2  | 2  | 1  | 4  | 10 | 10 | 2  | 5  | 5  | 0  | 5  | 0  | 0  | 0  | 10 | 0  | 0  | 0  | 4  | 0  | 10 | 1  | 1  | 6  | 1  | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |
| 7  | 10 | 0  | 5 | 0 | 2  | 1  | 0  | 10 | 10 | 5  | 10 | 10 | 6  | 0  | 0  | 10 | 2  | 1  | 10 | 1  | 5  | 5  | 2  | 3  | 5  | 0  | 2  | 0  | 1  | 3  | 7  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 8  |    |
| 8  | 5  | 0  | 5 | 2 | 0  | 2  | 10 | 0  | 1  | 3  | 5  | 0  | 0  | 0  | 2  | 4  | 5  | 2  | 10 | 6  | 0  | 5  | 5  | 2  | 5  | 0  | 5  | 5  | 0  | 2  | 8  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |
| 9  | 0  | 2  | 5 | 2 | 0  | 2  | 10 | 1  | 0  | 10 | 2  | 1  | 5  | 2  | 0  | 3  | 0  | 2  | 0  | 0  | 4  | 0  | 5  | 2  | 0  | 5  | 2  | 2  | 5  | 2  | 9  | 2  | 0  | 4  | 0  | 0  | 0  | 0  | 7  |    |
| 10 | 5  | 2  | 1 | 0 | 0  | 1  | 5  | 3  | 10 | 0  | 5  | 5  | 6  | 0  | 1  | 5  | 5  | 0  | 5  | 2  | 3  | 5  | 0  | 5  | 2  | 10 | 10 | 1  | 5  | 2  | 9  | 2  | 1  | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  |    |
| 11 | 2  | 1  | 4 | 6 | 0  | 4  | 10 | 5  | 2  | 5  | 0  | 0  | 0  | 1  | 2  | 1  | 0  | 2  | 0  | 0  | 6  | 6  | 0  | 4  | 5  | 3  | 2  | 2  | 10 | 8  | 3  | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |    |    |
| 12 | 5  | 0  | 1 | 0 | 2  | 10 | 10 | 0  | 1  | 5  | 0  | 0  | 5  | 5  | 2  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 4  | 5  | 10 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 5  | 5  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  |    |    |
| 13 | 0  | 5  | 0 | 2 | 0  | 10 | 6  | 0  | 5  | 6  | 0  | 5  | 0  | 2  | 0  | 4  | 2  | 2  | 1  | 0  | 6  | 2  | 1  | 5  | 5  | 0  | 0  | 1  | 5  | 5  | 6  | 0  | 5  | 5  | 2  | 5  | 4  | 8  | 6  |    |
| 14 | 0  | 0  | 4 | 5 | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 1  | 5  | 2  | 0  | 2  | 1  | 0  | 5  | 3  | 10 | 0  | 0  | 4  | 2  | 0  | 0  | 4  | 2  | 5  | 5  | 3  | 1  | 0  | 6  | 0  | 0  | 0  | 0  | 9  |    |
| 15 | 2  | 0  | 0 | 2 | 0  | 5  | 0  | 2  | 0  | 1  | 2  | 2  | 0  | 2  | 0  | 4  | 5  | 1  | 0  | 1  | 0  | 5  | 0  | 2  | 0  | 0  | 5  | 1  | 1  | 0  | 0  | 4  | 7  | 9  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |    |
| 16 | 0  | 0  | 4 | 5 | 0  | 5  | 10 | 4  | 3  | 5  | 1  | 0  | 4  | 1  | 4  | 0  | 0  | 3  | 0  | 2  | 2  | 0  | 2  | 0  | 5  | 0  | 5  | 2  | 5  | 10 | 0  | 0  | 8  | 8  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  |    |
| 17 | 5  | 0  | 0 | 1 | 2  | 0  | 2  | 5  | 0  | 5  | 0  | 0  | 2  | 0  | 5  | 0  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 6  | 5  | 3  | 5  | 0  | 0  | 5  | 1  | 0  | 5  | 2  | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |
| 18 | 6  | 2  | 6 | 1 | 1  | 5  | 1  | 2  | 2  | 0  | 2  | 0  | 2  | 5  | 1  | 3  | 2  | 0  | 5  | 1  | 2  | 10 | 10 | 4  | 0  | 0  | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 1  | 4  | 0  | 1  | 2  | 3  | 0  |    |
| 19 | 3  | 0  | 3 | 1 | 0  | 0  | 10 | 10 | 0  | 5  | 0  | 0  | 1  | 3  | 0  | 0  | 2  | 5  | 0  | 0  | 5  | 5  | 1  | 0  | 5  | 2  | 1  | 2  | 10 | 10 | 0  | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 7  |    |
| 20 | 0  | 1  | 2 | 1 | 0  | 0  | 1  | 6  | 0  | 2  | 0  | 2  | 0  | 10 | 1  | 2  | 0  | 1  | 0  | 0  | 5  | 2  | 1  | 3  | 1  | 5  | 6  | 5  | 5  | 3  | 0  | 0  | 4  | 1  | 0  | 0  | 2  | 0  | 0  |    |
| 21 | 1  | 6  | 5 | 2 | 2  | 0  | 5  | 0  | 4  | 3  | 0  | 0  | 6  | 0  | 0  | 2  | 0  | 2  | 5  | 5  | 0  | 4  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |    |
| 22 | 10 | 1  | 5 | 2 | 0  | 10 | 5  | 5  | 0  | 5  | 6  | 4  | 2  | 0  | 5  | 0  | 0  | 10 | 3  | 2  | 4  | 0  | 5  | 0  | 4  | 4  | 5  | 0  | 2  | 5  | 0  | 0  | 4  | 4  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |
| 23 | 0  | 0  | 2 | 4 | 5  | 0  | 2  | 5  | 5  | 0  | 6  | 5  | 1  | 4  | 0  | 2  | 6  | 10 | 1  | 1  | 0  | 5  | 0  | 0  | 4  | 4  | 1  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 4  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 4  |    |
| 24 | 10 | 1  | 1 | 0 | 1  | 0  | 3  | 2  | 2  | 5  | 0  | 10 | 5  | 2  | 2  | 0  | 5  | 4  | 0  | 3  | 1  | 0  | 0  | 0  | 5  | 5  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 7  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  |    |
| 25 | 2  | 2  | 0 | 2 | 0  | 0  | 5  | 5  | 0  | 2  | 4  | 1  | 5  | 0  | 0  | 5  | 3  | 0  | 5  | 1  | 0  | 4  | 4  | 5  | 0  | 1  | 0  | 10 | 1  | 0  | 0  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 7  |    |
| 26 | 1  | 2  | 0 | 0 | 2  | 4  | 0  | 0  | 5  | 10 | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  | 0  | 2  | 5  | 0  | 4  | 4  | 5  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 8  |    |
| 27 | 1  | 5  | 3 | 2 | 1  | 0  | 2  | 5  | 2  | 10 | 3  | 0  | 0  | 4  | 5  | 5  | 0  | 5  | 1  | 6  | 0  | 5  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 9  |    |
| 28 | 1  | 1  | 1 | 2 | 0  | 10 | 0  | 5  | 2  | 1  | 2  | 0  | 1  | 2  | 1  | 2  | 0  | 0  | 2  | 5  | 5  | 0  | 0  | 1  | 10 | 0  | 0  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |
| 29 | 0  | 10 | 0 | 5 | 2  | 1  | 1  | 0  | 5  | 5  | 2  | 0  | 5  | 5  | 1  | 5  | 5  | 0  | 10 | 5  | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 0  | 0  | 2  | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |    |
| 30 | 1  | 5  | 2 | 5 | 1  | 1  | 3  | 2  | 2  | 10 | 1  | 5  | 5  | 0  | 10 | 1  | 0  | 10 | 3  | 0  | 5  | 2  | 0  | 0  | 0  | 10 | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  |    |
| 31 | 1  | 2  | 3 | 4 | 5  | 6  | 3  | 8  | 9  | 9  | 8  | 5  | 6  | 3  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 4  |    |    |
| 32 | 1  | 4  | 7 | 8 | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 3  | 5  | 0  | 1  | 4  | 0  | 5  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |    |    |
| 33 | 8  | 5  | 0 | 2 | 0  | 5  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 5  | 0  | 7  | 8  | 2  | 1  | 0  | 4  | 5  | 4  | 4  | 7  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 4  |    |
| 34 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 4  | 5  | 2  | 1  | 5  | 6  | 9  | 8  | 5  | 4  | 2  | 1  | 0  | 4  | 0  | 1  | 2  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 4  |    |
| 35 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |    |    |
| 36 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |    |
| 37 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 4  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  |    |    |
| 38 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 8  | 0  | 0  | 0  | 0  | 3  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  |    |    |
| 39 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 6  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 4  |    |    |
| 40 | 1  | 2  | 0 | 1 | 5  | 0  | 8  | 0  | 7  | 5  | 1  | 2  | 0  | 9  | 0  | 5  | 0  | 2  | 7  | 0  | 1  | 0  | 4  | 5  | 7  | 8  | 9  | 0  | 0  | 2  | 4  | 1  | 4  | 4  | 1  | 0  | 2  | 5  | 4  |    |
|    | 1  | 2  | 3 | 4 | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |

## C.1.3 Layout final – 40 departamentos

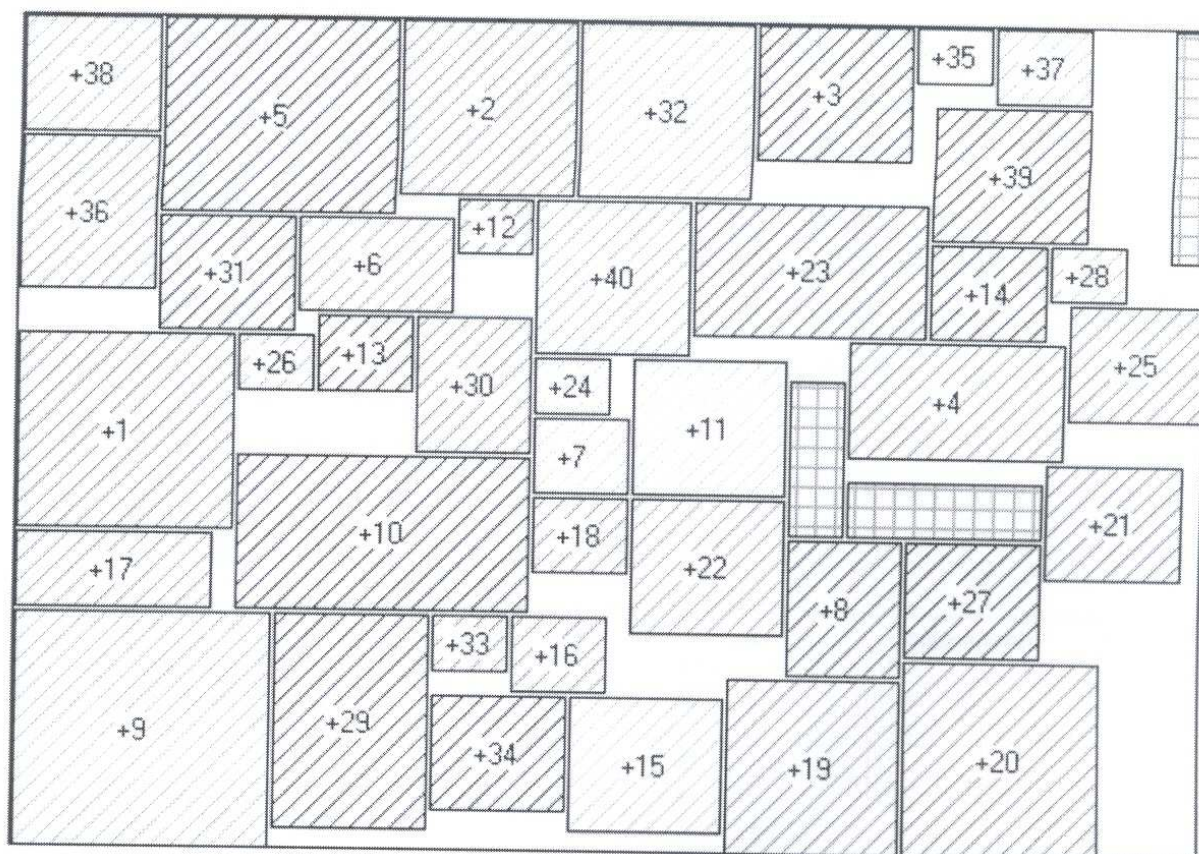


Figura 8.24 Layout final - teste com 40 deptos.

Neste teste foram consideradas 3 áreas ocupadas. Os departamentos 8, 19 e 29 devem ficar na vertical, os departamentos 4, 10 e 17 devem ficar na horizontal, o departamento 5 deve ficar longe do departamento 32, o departamento 2 deve ficar perto do departamento 5 e também deve ficar perto do departamento 32.



## C.2 Teste com 55 departamentos

### C.2.1 Características geométricas

#### *Áreas ocupadas no interior da planta.*

Este teste possui 5 áreas ocupadas e identificadas sequencialmente pelos números 1, 2, 3, 4 e 5. Para identifica-las no interior da planta, é necessário informar as coordenadas (Xinício,Yinício) e as dimensões (Largura x Comprimento) de cada área, conforme tabela 8.15.

Tabela 8.15. Áreas ocupadas para 55 departamentos

| <b>Ocupados</b> |                |                |                |                    |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
|                 | <b>Xinício</b> | <b>Yinício</b> | <b>Largura</b> | <b>Comprimento</b> |
| <b>1</b>        | <b>38</b>      | <b>1</b>       | <b>37</b>      | <b>3</b>           |
| <b>2</b>        | <b>41</b>      | <b>35</b>      | <b>3</b>       | <b>14</b>          |
| <b>3</b>        | <b>60</b>      | <b>1</b>       | <b>12</b>      | <b>31</b>          |
| <b>4</b>        | <b>52</b>      | <b>38</b>      | <b>23</b>      | <b>3</b>           |
| <b>5</b>        | <b>55</b>      | <b>57</b>      | <b>4</b>       | <b>36</b>          |

#### *Características geométricas dos departamentos fixos e móveis.*

Este teste possui 55 departamentos, onde os cinco primeiros são do tipo fixos. A identificação dos tipos de departamentos é a seguinte: se o sinal “-” estiver antes do número, identifica departamentos do tipo “fixos” e se o sinal “+” estiver antes do número identifica departamentos do tipo “móveis”. Os departamentos são numerados sequencialmente (-1, -2, ..., -5, +1, +2, +3, ..., +50). Para que o sistema possa atribuir os departamentos do tipo “fixos” à planta, é necessário informar a área, as coordenadas (Xinício,Yinício), a orientação, o quanto de área o departamento pode perder para as áreas ocupadas, as razões de aspectos (ver a tabela 8.16). Para que o sistema possa atribuir os departamentos do tipo “móveis” à planta, é necessário informar a área, a orientação, o quanto de área o departamento pode perder para as áreas ocupadas, as razões de aspectos e a redução máxima de área permitida para cada departamento. O campo “Área mínima” é um campo de saída de dados. Neste campo o sistema informa qual é a área mínima necessária para se alocar o departamento em questão. A tabela 8.17 mostra todas as informações necessárias que o sistema precisa sobre os departamentos.



Tabela 8.16 Características geométricas dos deptos Fixos

| Fixos |      |         |         |            |          |            |            |
|-------|------|---------|---------|------------|----------|------------|------------|
|       | Área | Xinício | Yinício | Orientação | RA Morta | R.Asp.Mín. | R.Asp.Máx. |
| -1    | 60   | 28      | 1       |            | 0        | ,5         | 1          |
| -2    | 450  | 69      | 36      |            | 0        | 1          | 1          |
| -3    | 360  | 41      | 1       |            | 0        | 1          | 1          |
| -4    | 200  | 1       | 47      |            | 0        | 1          | 1          |
| -5    | 80   | 42      | 38      | h          | 0        | ,6         | 1,2        |

Tabela 8.17 Características geométricas dos deptos Móveis

| Móveis |      |            |                    |            |            |                  |             |
|--------|------|------------|--------------------|------------|------------|------------------|-------------|
|        | Área | Orientação | Perda A. Morta [%] | R.Asp.Mín. | R.Asp.Máx. | Red.Máx.Área [%] | Área Mínima |
| 1      | 100  |            | 0                  | 0,7        | 1          | 0                |             |
| 2      | 80   |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| 3      | 50   |            | 0                  | 0,7        | 1,3        | 0                |             |
| 4      | 60   | h          | 0                  | 0,5        | 0,8        | 0                |             |
| 5      | 120  |            | 0                  | 0,9        | 1          | 0                |             |
| 6      | 40   |            | 0                  | 0,6        | 1          | 0                |             |
| 7      | 20   |            | 0                  | 0,7        | 1,4        | 0                |             |
| 8      | 40   | v          | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| 9      | 150  | v          | 0                  | 0,8        | 1,1        | 0                |             |
| 10     | 120  | h          | 0                  | 0,5        | 1,5        | 0                |             |
| 11     | 50   |            | 0                  | 0,7        | 1,1        | 0                |             |
| 12     | 10   |            | 0                  | 0,8        | 1,2        | 0                |             |
| 13     | 20   |            | 0                  | 0,95       | 1,5        | 0                |             |
| 14     | 30   |            | 0                  | 0,75       | 1,25       | 0                |             |
| 15     | 50   |            | 0                  | 0,9        | 1,1        | 0                |             |
| 16     | 20   |            | 0                  | 0,8        | 1,5        | 0                |             |
| 17     | 40   | h          | 0                  | 0,4        | 1,4        | 0                |             |
| 18     | 20   |            | 0                  | 0,9        | 1,9        | 0                |             |
| 19     | 80   | v          | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| 20     | 100  |            | 0                  | 0,95       | 1,15       | 0                |             |
| 21     | 40   |            | 0                  | 0,5        | 1,5        | 0                |             |
| 22     | 50   |            | 0                  | 1          | 1,1        | 0                |             |
| 23     | 80   |            | 0                  | 0,6        | 1          | 0                |             |
| 24     | 10   |            | 0                  | 0,9        | 1          | 0                |             |
| 25     | 40   |            | 0                  | 0,8        | 1,1        | 0                |             |
| 26     | 10   |            | 0                  | 0,5        | 1,2        | 0                |             |
| 27     | 40   |            | 0                  | 0,8        | 1          | 0                |             |
| 28     | 10   |            | 0                  | 0,5        | 1,3        | 0                |             |
| 29     | 80   | v          | 0                  | ,7         | 1,05       | 0                |             |
| 30     | 40   |            | 0                  | 0,9        | 1,1        | 0                |             |
| 31     | 40   |            | 0                  | ,9         | 1,2        | 0                |             |
| 32     | 80   |            | 0                  | ,9         | 1,5        | 0                |             |
| 33     | 10   |            | 0                  | ,9         | 1,1        | 0                |             |
| 34     | 40   |            | 0                  | ,8         | 1          | 0                |             |
| 35     | 10   |            | 0                  | ,8         | 1,3        | 0                |             |
| 36     | 50   |            | 0                  | ,8         | 1,2        | 0                |             |
| 37     | 20   |            | 0                  | ,8         | 1,5        | 0                |             |
| 38     | 40   |            | 0                  | ,9         | 1,6        | 0                |             |
| 39     | 50   |            | 0                  | ,9         | 1,1        | 0                |             |
| 40     | 60   |            | 0                  | 1          | 1,8        | 0                |             |
| 41     | 150  |            | 0                  | ,7         | 1,6        | 0                |             |
| 42     | 210  |            | 0                  | ,3         | 1          | 0                |             |
| 43     | 110  |            | 0                  | ,5         | 1          | 0                |             |
| 44     | 60   |            | 0                  | ,85        | 1,6        | 0                |             |
| 45     | 45   |            | 0                  | ,9         | 1,2        | 0                |             |
| 46     | 30   |            | 0                  | ,7         | 1,05       | 0                |             |
| 47     | 80   |            | 0                  | ,95        | 1,15       | 0                |             |
| 48     | 10   |            | 0                  | ,8         | 1,1        | 0                |             |
| 49     | 65   |            | 0                  | ,75        | 1,2        | 0                |             |
| 50     | 30   |            | 0                  | ,6         | 1          | 0                |             |

Esta matriz é simétrica e representa o fluxo (volume de tráfego) entre cada par de departamentos. A tabela 8.18 mostra esta matriz.

Tabela 8.18 Matriz de fluxo – 55 departamentos

[illegible]

### C.2.3 Layout final – 55 departamentos

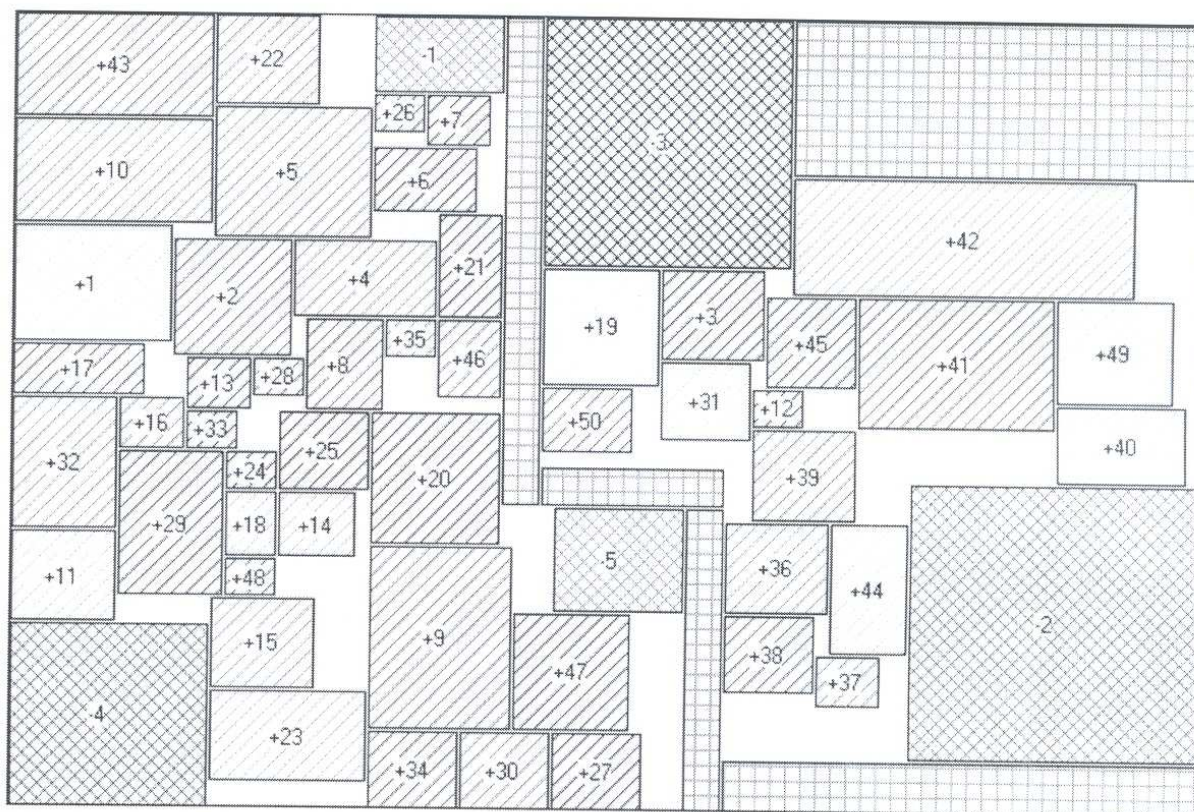


Figura 8.25 Layout final - teste com 55 departamentos.

Neste teste considerou-se que os departamentos 8, 9, 19 e 29 devem ficar na vertical, os departamentos 10 e 17 devem ficar na horizontal, o departamento 9 deve ficar perto do departamento 47, o departamento 15 deve ficar longe do departamento 19, o departamento 23 deve ficar longe do departamento fixo 3 e o departamento 14 deve ficar longe do departamento fixo 4 e possui cinco áreas ocupadas. Dos 55 departamentos do teste, 5 são atribuídos previamente a localizações específicas dentro do layout (são os chamados departamentos fixos).



# **Anexo D**

## **AVOLI**

Este anexo tem por finalidade apresentar os principais procedimentos para a operação do sistema AVOLI.

### **D.1 Introdução**

---

#### **D.1.1 Bem-vindo**

Bem-vindo ao AVOLI (Ambiente Visual para Otimização de Layout Industrial). Este software faz o a otimização do layout considerando restrições realistas presentes no ambiente industrial. O AVOLI pode tornar o trabalho de engenheiros e projetistas de layout muito mais eficiente através dos resultados fornecidos pelo sistema. Para permitir o seu uso, o sistema possui uma interface visual de fácil acesso.

---

#### **D.1.2 Instalação do AVOLI**

Não é necessário instalar o AVOLI. Para que o sistema possa ser utilizado, basta copiar o arquivo executável de nome LAYOUT1.EXE para o computador.

---

#### **D.1.3 AVOLI – Ambiente**

O ambiente AVOLI foi desenvolvido para processamento em plataforma Windows, permite a realização de testes, configuração de parâmetros, coleta de dados (histórico), coleta de resultados dos testes (Log) e a visualização dos macro blocos através de saídas gráficas que representam os departamentos no layout. O sistema também disponibiliza gráficos que mostram a evolução do processo de refinamento de uma solução, escolhendo em termos

quantitativos, a melhor solução encontrada que não viole nenhuma das restrições impostas. É flexível, oferece um conjunto de outras soluções viáveis que oportunamente poderão ser avaliadas pelo projetista.

### D.1.4 Acesso

Após ser executada a aplicação AVOLI, a interface de acesso ao sistema será apresentada conforme figura 8.26:

**AVOLI 1.0 - D:\Users\Valdair\Layout\4 testes\Teste S5 - 5deptosfixos - Setup - 1001.71 - 09.04.1999 - 20.01.2000**

Geral | Ações | Ferramentas | Comunicação | Processo | Agentes

Ambiente | Configurações | Ocupados | Fixos | Móveis | Layout Manual | Tabelas | Listas | Posições | Resultados | Layout

**Área Total Disponível**

Comprimento: 90 m

Largura: 60 m

Unidade: Metros

Área Total: 5400 m<sup>2</sup>

Orientação: Horizontal

**Departamentos**

|                                                  | Declarada / Usada |                |
|--------------------------------------------------|-------------------|----------------|
| Nº Áreas Ocupadas: 5                             | 738 / 738         | m <sup>2</sup> |
| Nº Deptos Fixos: 5                               | 1150 / 0          | m <sup>2</sup> |
| Nº Deptos Móveis: 50                             | 2790 / 0          | m <sup>2</sup> |
| <input checked="" type="checkbox"/> Estimar Área | Total: 4678 / 738 | m <sup>2</sup> |

**Solução Inicial**

☒ Automática

☐ Aleatória: 6 Listas

☐ Lista Manual

☐ Layout Manual

☒ Inicialização

**Solução Otimizada ( métodos )**

☐ Força Bruta

☒ Busca Tabu

☐ Temperatura Simulada

☐ Algoritmo Genético

☐ Multi-Agentes

☒ Iniciar Processo

☒ Abrir Tabelas

☒ Salvar Tabelas

☒ Encerrar

Figura 8.26 – Interface de acesso ao sistema

O sistema pode ser acessado através da barra de menu (ver figura 8.27) ou diretamente através de um conjunto de guias.

### OPÇÕES DE MENU

Geral | Ações | Ferramentas | Comunicação | Processo

Figura 8.27 – Barra de Menu

## MENU GERAL

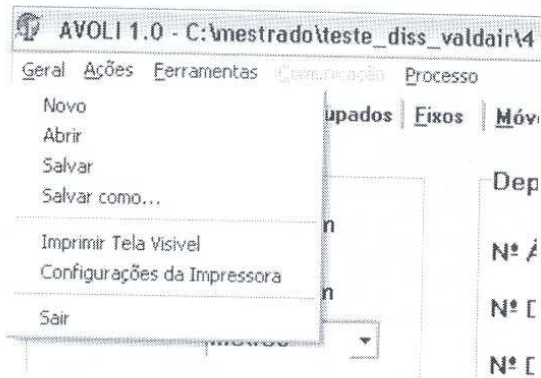


Figura 8.28 – Menu Geral

**Novo:** Cria um novo arquivo com configurações **default**.

**Abrir:** Abre um arquivo que já existe.

**Salvar:** Salva os arquivos correntes.

**Salvar Como...:** Salva os arquivos correntes, permitindo a escolha por um nome e um local específico.

**Imprimir Tela Visível:** Imprime o conteúdo de uma tela.

**Configurações da Impressora:** Permite a escolha da impressora, bem como, as configurações de impressão.

**Sair :** O AVOLI é encerrado.

## MENU AÇÕES

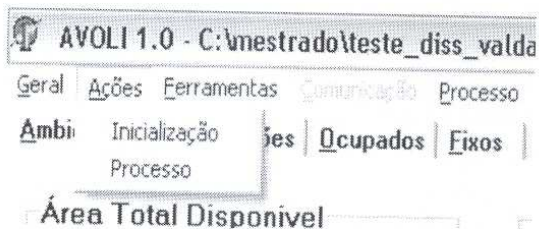


Figura 8.29 – Menu Ações

**Inicialização:** Gera uma solução inicial a partir dos dados básicos de entrada.

**Processo:** Inicia o processo de melhoria de solução, baseando-se em um dos métodos de otimização previamente escolhido.

## MENU FERRAMENTAS

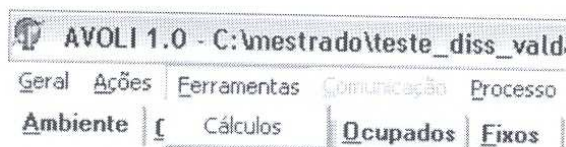


Figura 8.30 –Menu Ferramentas

**Cálculos:** Permite a execução do utilitário Cálculos diversos, conforme figura 8.31.



## CÁLCULOS DIVERSOS

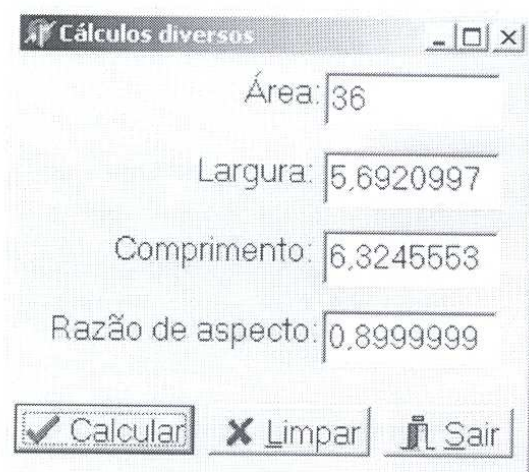


Figura 8.31 –Utilitário Cálculos Diversos

O usuário deverá preencher apenas dois dos quatro campos. Os demais são preenchidos automaticamente pelo sistema.

Botões:

**Calcular:** Efetua os cálculos com base nas informações fornecidas pelo usuário.

**Limpar:** Limpa todos os campos para um novo cálculo.

**Sair:** O utilitário é finalizado.

## MENU PROCESSO

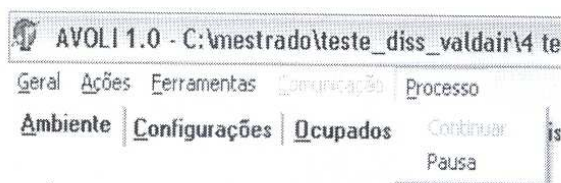


Figura 8.32 –Menu Processo

**Continuar:** Continua a execução do programa, caso o mesmo tenha sido interrompido através do botão pausa.

**Pausa:** Para um processo que está em execução.

---

### D.1.5 Área de Trabalho do AVOLI

A área de trabalho do AVOLI é basicamente composta por 11 telas. O usuário interage com o sistema fornecendo entradas de dados e de configurações e o sistema disponibiliza para o usuário um conjunto de informações contendo os resultados obtidos.

---

### D.1.6 Exemplo - Dados de entrada

As figuras 8.33, 8.34, 8.35, 8.36 e 8.37 são exemplos de entrada de dados no AVOLI.

## GUIA AMBIENTE

### Ambiente

| <b>Área Total Disponível</b><br>Comprimento: 90 m<br>Largura: 60 m<br>Unidade: Metros<br>Área Total: 5400 m²<br>Orientação: Horizontal |                       | <b>Departamentos</b><br><table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Declarada / Usada</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nº Áreas Ocupadas: 5</td> <td>738 / 738 m²</td> </tr> <tr> <td>Nº Deptos Fixos: 5</td> <td>1150 / 1173 m²</td> </tr> <tr> <td>Nº Deptos Móveis: 50</td> <td>2790 / 2941 m²</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Estimar Área</td> <td>Total: 4678 / 4852 m²</td> </tr> </tbody> </table> |  |  | Declarada / Usada | Nº Áreas Ocupadas: 5 | 738 / 738 m² | Nº Deptos Fixos: 5 | 1150 / 1173 m² | Nº Deptos Móveis: 50 | 2790 / 2941 m² | <input checked="" type="checkbox"/> Estimar Área | Total: 4678 / 4852 m² |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|-------------------|----------------------|--------------|--------------------|----------------|----------------------|----------------|--------------------------------------------------|-----------------------|
|                                                                                                                                        | Declarada / Usada     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |                   |                      |              |                    |                |                      |                |                                                  |                       |
| Nº Áreas Ocupadas: 5                                                                                                                   | 738 / 738 m²          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |                   |                      |              |                    |                |                      |                |                                                  |                       |
| Nº Deptos Fixos: 5                                                                                                                     | 1150 / 1173 m²        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |                   |                      |              |                    |                |                      |                |                                                  |                       |
| Nº Deptos Móveis: 50                                                                                                                   | 2790 / 2941 m²        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |                   |                      |              |                    |                |                      |                |                                                  |                       |
| <input checked="" type="checkbox"/> Estimar Área                                                                                       | Total: 4678 / 4852 m² |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |                   |                      |              |                    |                |                      |                |                                                  |                       |

|                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Solução Inicial</b><br><input checked="" type="radio"/> Automática<br><input type="radio"/> Aleatória: 6 Listas<br><input type="radio"/> Lista Manual<br><input type="radio"/> Layout Manual<br><input checked="" type="button" value="Inicialização"/> | <b>Solução Otimizada ( métodos )</b><br><input type="radio"/> Força Bruta<br><input checked="" type="radio"/> Busca Tabu<br><input type="radio"/> Temperatura Simulada<br><input type="radio"/> Algoritmo Genético<br><input type="radio"/> Multi-Agentes<br><input checked="" type="button" value="Iniciar Processo"/> | <input checked="" type="button" value="Abrir Tabelas"/><br><input checked="" type="button" value="Salvar Tabelas"/><br><input checked="" type="button" value="Encerrar"/> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Figura 8.33 – Guia Ambiente

Para a guia ambiente, as informações necessárias são: as dimensões do ambiente (quadro externo para o layout), número de departamentos fixos, móveis e áreas ocupadas. Para poder iniciar os cálculos, o sistema necessita que todas as informações referentes ao número de departamentos declarados sejam fornecidas. Assim, é necessário realizar o preenchimento das guias OCUPADOS, FIXOS e/ou MÓVEIS.

## TABELA DE ÁREAS OCUPADAS

| Ocupados |         |         |         |             |
|----------|---------|---------|---------|-------------|
|          | Xinício | Yinício | Largura | Comprimento |
| 1        | 38      | 1       | 37      | 3           |
| 2        | 41      | 35      | 3       | 14          |
| 3        | 60      | 1       | 12      | 31          |
| 4        | 52      | 38      | 23      | 3           |
| 5        | 55      | 57      | 4       | 36          |

Figura 8.34 – Guia Áreas Ocupadas

### Descrição dos campos

**Xinício:** Permite a configuração das coordenadas X iniciais de cada área ocupada.

**Yinício:** Permite a configuração das coordenadas Y iniciais de cada área ocupada.

**Largura:** Largura de cada área ocupada.

**Comprimento:** Comprimento de cada área ocupada.

## TABELA DE DEPARTAMENTOS FIXOS

| Fixos |      |         |         |            |          |            |            |
|-------|------|---------|---------|------------|----------|------------|------------|
|       | Área | Xinício | Yinício | Orientação | RA Morta | R.Asp.Mín. | R.Asp.Máx. |
| -1    | 60   | 28      | 1       |            | 0        | ,5         | 1          |
| -2    | 450  | 69      | 36      |            | 0        | 1          | 1          |
| -3    | 360  | 41      | 1       |            | 0        | 1          | 1          |
| -4    | 200  | 1       | 47      |            | 0        | 1          | 1          |
| -5    | 80   | 42      | 38      | h          | 0        | ,6         | 1,2        |

Figura 8.35 – Guia Departamentos Fixos

## Descrição dos campos

**Área:** Quantidade mínima de área para os departamentos do tipo fixos.

**Xinício:** Permite a configuração das coordenadas X iniciais de cada área ocupada.

**Yinício:** Permite a configuração das coordenadas Y iniciais de cada área ocupada.

**Orientação:** Permite ao usuário definir a orientação do departamento dentro do layout.

**RA Morta:** O quanto o departamento pode perder de área por sobreposição de áreas mortas.

**R. Asp. Mín:** Limite inferior mínimo da razão de aspecto permitida.

**R. Asp. Máx:** Limite superior máximo da razão de aspecto permitida.

## TABELA DE DEPARTAMENTOS MÓVEIS

| Móveis |      |            |                    |            |            |                  |             |
|--------|------|------------|--------------------|------------|------------|------------------|-------------|
|        | Área | Orientação | Perda A. Morta [%] | R.Asp.Mín. | R.Asp.Máx. | Red.Máx.Área [%] | Área Mínima |
| +1     | 100  |            | 0                  | 0,7        | 1          | 0                |             |
| +2     | 80   |            | 0                  | 1          | 1          | 0                |             |
| +3     | 50   |            | 0                  | 0,7        | 1,3        | 0                |             |
| +4     | 60   | h          | 0                  | 0,5        | 0,8        | 0                |             |
| +5     | 120  |            | 0                  | 0,9        | 1          | 0                |             |
| +6     | 40   |            | 0                  | 0,6        | 1          | 0                |             |
| +7     | 20   |            | 0                  | 0,7        | 1,4        | 0                |             |
| ---    | ---  | ---        | ---                | ---        | ---        | ---              | ---         |
| ---    | ---  | ---        | ---                | ---        | ---        | ---              | ---         |
| +47    | 80   |            | 0                  | ,95        | 1,15       | 0                |             |
| +48    | 10   |            | 0                  | ,8         | 1,1        | 0                |             |
| +49    | 65   |            | 0                  | ,75        | 1,2        | 0                |             |
| +50    | 30   |            | 0                  | ,6         | 1          | 0                |             |

Figura 8.36 – Guia Departamentos Móveis



### descrição dos campos

**Área:** Quantidade mínima de área para os departamentos do tipo móveis.

**Orientação:** Permite ao usuário definir a orientação do departamento dentro do layout.

**Perda A Morta (%):** O máximo permitido de área perdida por sobreposição de áreas mortas.

**R. Asp. Mín:** Limite inferior mínimo da razão de aspecto permitida.

**R. Asp. Máx:** Limite superior máximo da razão de aspecto permitida.

**Red. Máx. Área (%):** Caso seja necessária uma redução de área, esta será a máxima redução de área permitida para o departamento.

**Área Mínima:** Campo preenchido pelo sistema.

## CONFIGURAÇÕES INICIAIS

**AVOLI 1.0 - D:\Users\Valdair\Layout\4 testes\Teste 55 - Sdeptofixos - 50cup - 100.171 - avoli1.0.exe**

**Configurações Iniciais**

**Configurações do Particionamento**

- ☒ Busca da Razão de Aspecto  
Número máximo de intervalos:
- ☒ Redução de área  
Número máximo de intervalos:
- ☒ Correção das violações de proximidade  
Número máximo de tentativas:
- ☒ Diminuir espaço entre os departamentos
- ☒ Corrigir perda de área por sobreposição (somente móveis.)
- ☐ Atualizar Layout Gráfico durante o processo de otimização
- Tamanho do historico das Listas:

**Configurações Tabu**

Tempo Tabu

- ☐ Fixo em  iterações
- ☐ Aleatório de  a
- ☒ Variável de  a

Número de iterações:

Estrutura de Vizinhança Utilizada

- ☐ Troca Simples
- ☒ Pseudo Trocas

Tipo de Trocas

- ☐ Simples
- ☒ Combinação 2 a 2

Avaliações Verdadeiras:

**Configurações dos Agentes**

Número de Ciclos:

Agentes

Comportamento:

- ☐ Mata-os no final dos ciclos
- ☒ Cria-los se necessário

Status: Ativo

Figura 8.37 – Guia Configurações Iniciais

### D.1.7 Exemplo – Saída de Dados

Através das guias de saída de dados o usuário poderá consultar informações instantâneas para o teste que está sendo realizado pelo sistema. As figuras 8.38, 8.39, 8.40, 8.41, 8.42, 8.43, 8.44 e 8.45 mostram exemplos de saídas de dados.

#### Sub-guia HISTÓRICO

Tabelas

Vizinhança | Lista Automática | Força Bruta | Busca Tabu | Agentes

Variáveis | Tabela Tabu | Histórico | Gráfico ( Melhoria % ) | Gráfico ( Utilidade )

| Nº  | Melhor | Atual  | Lista Usada na Solução Atual                                                      |
|-----|--------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1:  | 88231  | 88231  | -2   -3   +42   -4   +41   +9   +10   +5   +43   +20   +1   +2   +32   -5   +47   |
| 2:  | 86214  | 86214  | -2   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   +43   +20   +1   +2   +32   -5   +47  |
| 3:  | 86214  | 787780 | +43   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   -2   +20   +1   +2   +32   -5   +47  |
| 4:  | 86214  | 777480 | +43   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   -2   +20   +1   +2   +32   -5   +47  |
| 5:  | 86140  | 86140  | +43   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   +30   +20   +1   +2   +32   -5   +47 |
| 6:  | 86140  | 799710 | +43   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   +30   +20   +1   +2   +32   -5   +47 |
| 7:  | 86140  | 712470 | +43   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   +30   +20   +1   +2   +32   -5   +47 |
| 8:  | 86140  | 90778  | +43   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   +30   +20   +1   +2   +32   -5   +47 |
| 9:  | 79299  | 79299  | +43   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   +30   +20   +1   +2   +32   -5   +47 |
| 10: | 79299  | 80894  | +43   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   +30   +20   +1   +2   +32   -5   +47 |
| 11: | 79048  | 79048  | +43   -3   +42   +45   +41   +9   +10   +5   +30   +20   +1   +2   +32   -5   +47 |

Figura 8.38 – Histórico do conjunto de soluções visitadas

#### Sub-guia GRÁFICO MELHORIA

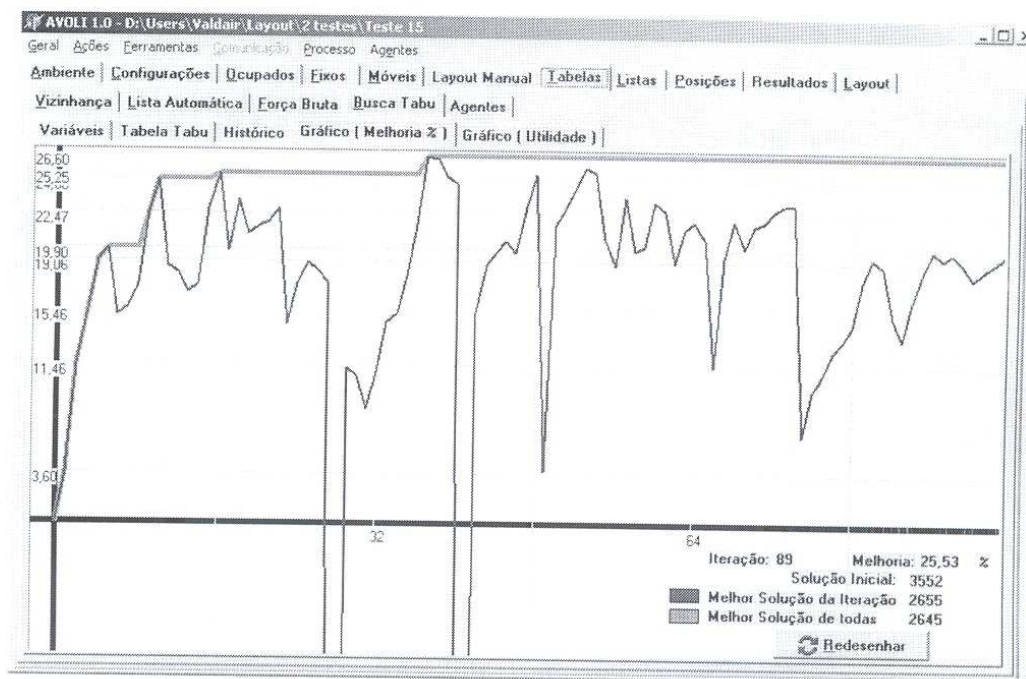


Figura 8.39 – Solução inicial – Gráfico de melhoria em percentual



## Sub-guia GRÁFICO UTILIDADE

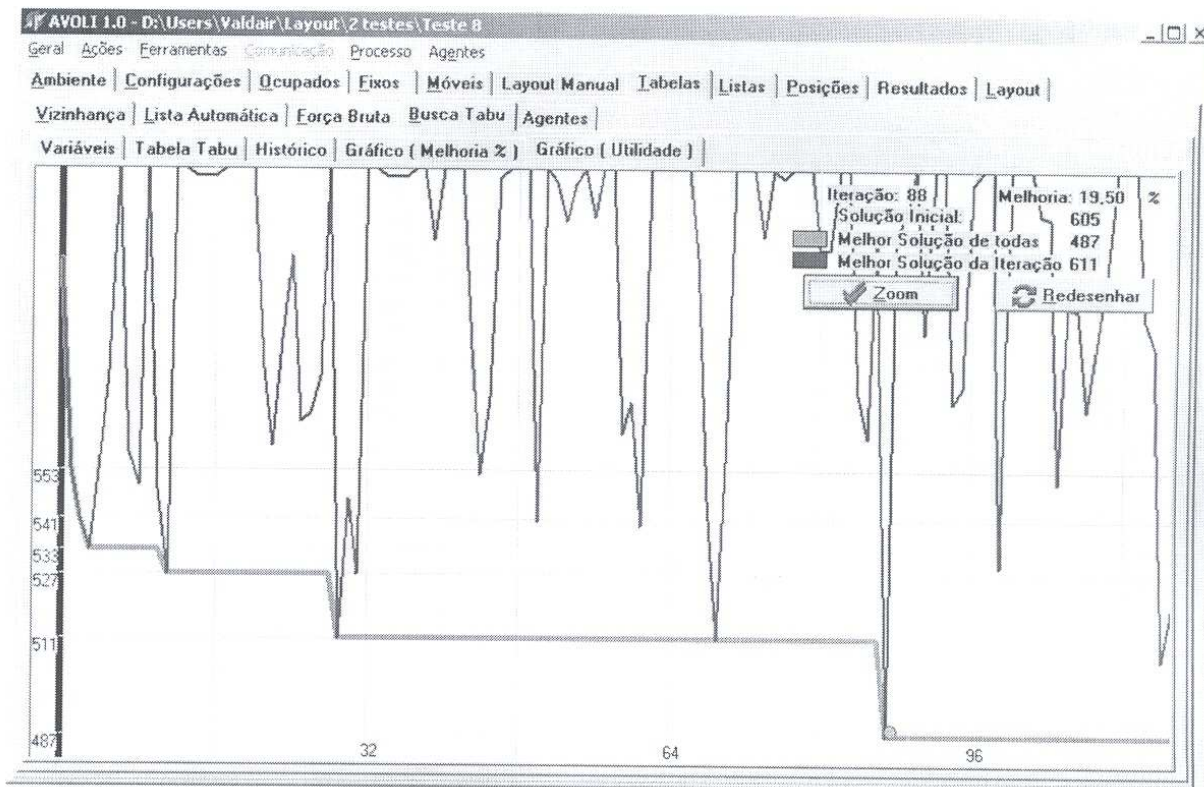


Figura 8.40 – Gráfico de evolução da busca Tabu

A sub-guia LISTAS funciona como entrada e saída de dados

| Listas    |     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |
|-----------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
| Utilidade | 1   | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12 | 13  | 14 |
| 6884900   | +34 | -3 | +42 | +45 | +41 | +49 | +10 | +17 | +31 | +6  | +1  | +2 | +4  | +3 |
| 73280000  | +47 | +9 | +15 | +3  | +2  | +4  | +5  | +21 | +35 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |
| 8298200   | -2  | +9 | +15 | +3  | +2  | +4  | +5  | +21 | +35 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |
| 8862800   | -2  | -3 | +15 | +3  | +2  | +4  | +5  | +21 | +35 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |
| 802510000 | -2  | -3 | +42 | +3  | +2  | +4  | +5  | +21 | +35 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |
| 75882000  | -2  | -3 | +42 | -4  | +2  | +4  | +5  | +21 | +35 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |
| 694930000 | -2  | -3 | +42 | -4  | +41 | +4  | +5  | +21 | +35 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |
| 80658000  | -2  | -3 | +42 | -4  | +41 | +9  | +5  | +21 | +35 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |
| 7986600   | -2  | -3 | +42 | -4  | +41 | +9  | +10 | +21 | +35 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |
| 7968000   | -2  | -3 | +42 | -4  | +41 | +9  | +10 | +5  | +35 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |
| 820710000 | -2  | -3 | +42 | -4  | +41 | +9  | +10 | +5  | +43 | +22 | +25 | +6 | +26 | +1 |

Figura 8.41 – Melhores soluções geradas





## GUIA DE RESULTADOS - LOG

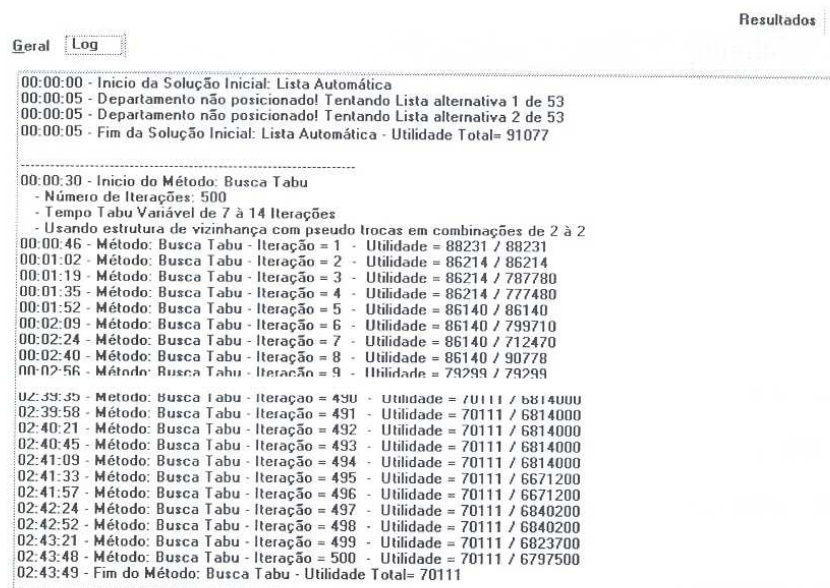


Figura 8.44 – Log de resultados

## GUIA LAYOUT - GRÁFICO

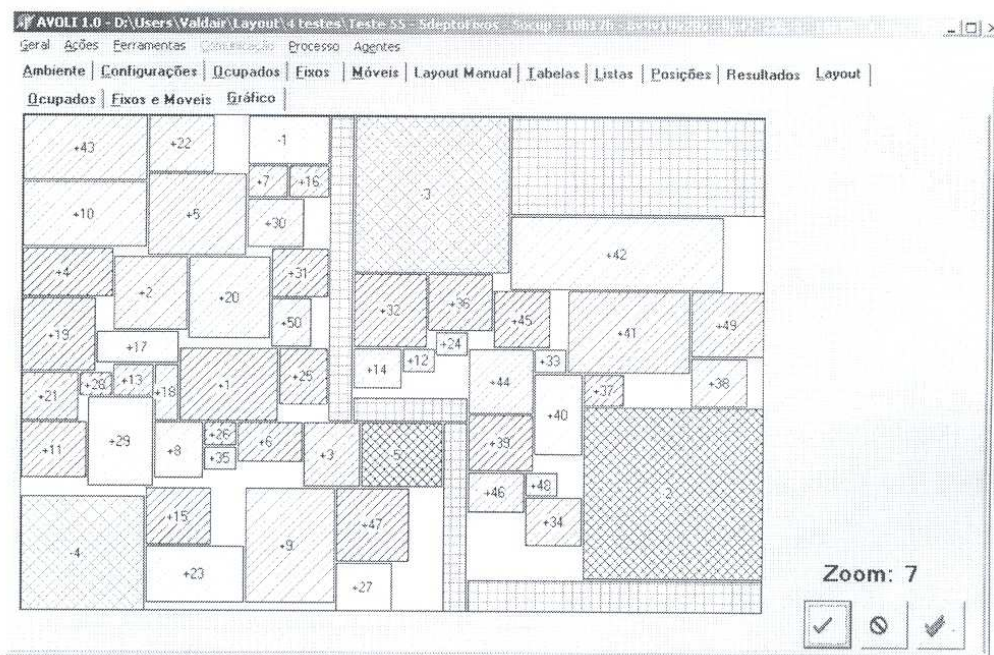


Figura 8.45 –Layout gráfico - Representação em 2D

# Índice Remissivo

---

2

2d · xviii

---

3

3d studio · 25

---

**A**

Aldep · xviii, 22, 23, 24

Algoritmo de construção · 39

Algoritmo genético · 2

*Altomod* · 25

Apple · 107

Arena · 25, 110

Armour · 107

Árvore binária · 17, 19

Askin · 30, 107

*Autocad* · 24, 25, 107

Avoli · xx, 61

Azadivar · 107

---

**B**

Bazaraa · 20, 107

Beckman · 109

Benchmark · 34, 51, 52, 57

Branch-and-bound · 20, 36

Bt · consulte . Consulte . Consulte

Buffa · 107, 111

Busca tabu · xx, 2, 6, 7, 33, 34, 35, 36, 48,  
50, 51, 108

Busca tabu · 2

---

**C**

Cândido · vi, 110

---

**Ch**

Chambers · 110

Chan · 111

Chiang · 32, 45, 54, 55, 62, 107

---

**C**

Ciclagem · 35, 47, 48

Cimtechnologies · 107

Cofad · 24

Coraini · 107

Corelap · xviii, 21, 22, 24, 109

Craft · xviii, 23, 24

Critério de aspiração · 48



---

**D**

Deisenroth · 107

*Delphi* · 51

Distância · 4, 7, 9, 20, 23, 30, 31

Diversificação · 4, 36

---

**E**

Edwards · 107

Elshafei · 20, 24, 107

*Estratégia de liberação* · 47

Estratégia de proibição · 47

Evans · 110

---

**F***Factory* · 24

Felipe m · 110

Fila tabu · 36

Fluxo padrão · 11

Foulds · 108

Francis · 108

Função objetivo · 7, 35, 45

Função objetivo · 31

Furtado · 108

---

**G**

Ga · xviii, 2

Garcia · 50, 108

Garey · 108

Gau · 109

Gellat · 109

*Genetic algorithm* · 2

Gilmore · 108

Glover · 49, 108

Gurgel · 108

---

**H**

Hale · 107

Hall · 108

Hansen · 108

Harland · 110

Harmon · 108

Harrison · 110

Heragu · 108, 109

Heurísticas · 7, 21

Holland · 109

---

**I**

Intensificação · 36

---

**J**

Johnson · 108

Johnston · 110

---

**K**

Kai-yin · 109

Kalchik · 109

Kirkpatrick · 109

Koopmans · 109

Kusiak · 108, 109

---

**L**

Laguna · 108  
Lawler · 109  
Layout de produto estático · 10  
Layout orientado ao produto · 10  
Layout por linha de produção · 11  
Lee · 109  
Levary · 109  
Lista tabu · 35, 36, 44, 45, 47  
Lorena · 108

---

**M**

Macro sistema · 37  
Manufatura · 1, 5, 6, 7, 8, 26, 64  
Mat · xix, 24  
Matriz tabu · 32, 46, 47  
Meller · 109  
Metaheurística · xx, 2, 6, 7, 33, 34, 36, 50  
Microstation · 109  
Mip · xviii  
Montreuil · 109  
Moore · 109  
Movimento tabu · 47, 48  
*Ms-windows 2000* · 51  
Müller · 48, 110

---

**N**

Nof · 107  
Nolla · 107  
Nugent · 52, 56, 110

---

**O**

Object pascal · 51  
Olivério · 50, 110  
Olivier · 110

---

**P**

Pegden · 110  
***Percentual de redução*** · 27  
Peterson · 108  
Planet · xviii, xix, 24  
Problema de layout · xx, 2, 4, 5, 7, 19, 20, 21, 23, 26, 50, 61  
*Promodel* · 25, 110

---

**Q**

Qap · xviii, 17, 18, 20, 44

---

**R**

Razão de área morta · 29  
***Razão de aspecto*** · 27, 28  
Recozimento simulado · 2  
*Redução de área* · 27  
Reeves · 110  
Robinson · 108  
Ruml · 110

---

**S**

Sahu · 110  
Scriabin · 24, 110  
Seehof · 110

Shannon · 110

Simulated annealing · 36

Slack · 110

Smith · 55, 111

Solução inicial · 23, 24, 34, 35, 38, 40, 42,  
43, 44, 51

Status tabu · 47, 48

Suresh · 55, 110

---

## *T*

Tabu search · xix, 2, 108

Tam · 20, 30, 55, 56, 110, 111

Tam & li · 55, 56

Tate · 111

Ts · 2

---

## *V*

Vecchi · 109

Vergin · 24, 110

Vizinhança · 35, 36, 44, 45, 47, 48

Vollman · 111

Vollmann · 110

---

## *W*

Wang · 107



## Referências Bibliográficas

- [APP72] Apple, J. M. and Deisenroth, M. P., “ *A computerized plant layout analysis and evaluation technique (PLANET)* ”. Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Annual Conference and Convention, AIIE, California, 121-127, 1972.
- [ARM63] Armour, G.C., and Buffa, E.S., “ *A Heuristic Algorithm and Simulation Approach to Relative Allocation of Facilities,*” Management Science, Vol 9, 294-309, 1963.
- [ASK93] Askin, Ronald G., Standridge, Charles R., *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, John Wiley e Sons Inc., 1993.
- [AUT93] Autosimulations, Manuais do Usuário, 1993.
- [AZA00] Azadivar, F., Wang, J., *Facility Layout Optimization using simulation and Genetic Algorithms*, International Journal of Production Research, 38, 17, 4369-4383, 2000.
- [BAZ75] Bazaraa, M. S. *Computerized Layout Design: A Branch and Bound Approach*, AIIE Transactions, 7, 4, 432-437, 1975.
- [BAZ79] Bazaraa, M.S.; Elshafei, A.N. *An exact branch and bound procedure for quadratic assignment problems*. Naval Research Logistics Quarterly 26, 109-121, 1979.
- [CHI01] Chiang, W. C., *Visual Facility Layout Design System*, International Journal Production Research, vol, 39, nº9, 1811-1836, 2001.
- [CIM89] Cimtechnologies Corp., 1989.
- [COR94] Coraini, A. L. S.; Nolla, I. M., AUTOCAD release 12: *Curso Básico e Prático*, Makron Books, 1994.
- [EDW70] Edwards, E. L. and Nof, S. Y., and Hale, M. E., *Modular allocation technique*. Management Science, 17, 161-169, 1970.
- [ELS77] Elshafei, A. N. *Hospital layout as a quadratic assignment problem*. Operations Research Quarterly, 28(1), 167-179, 1977.

- [FOU78] Foulds, L. R., and Robinson, D. F. *Graph Theoretic Heuristics for the Plant Layout Problem*. International Journal of Production Research, 16, 1, 27-37, 1978.
- [FRA92] Francis, Richard L., McGinnis, jr., and White, John A., *Facility Layout and Location: An Analytical Approach*. Prentice Hall, 2nd edition, 1992.
- [FUR97] Furtado, J.C.; Lorena, L.A.N. *Otimização de layout usando busca tabu*. Gestão e Produção. vol. 4, no. 1, 88-107, 1997.
- [GAR89] Garcia, J. E., *Plant Layout*, Fundacentro, 1989.
- [GAR79] Garey, M. R., and Johnson, D. S. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman and Company, New York, New York 1979.
- [GIL62] Gilmore, P. C., *Optimal and Suboptimal Algorithms for the Quadratic Assignment Problem*. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 10, 305-313, 1962.
- [GLO89a] Glover, F., *Tabu Search - Part I*. ORSA Journal on Computing, vol. 1, no. 3, 190-206, 1989a.
- [GLO89b] Glover, F., *Tabu Search - Part II*, ORSA Journal on Computing, vol. 2, no. 1, 4-32, 1989b.
- [GLO90] Glover, F., *Tabu Search - A tutorial*. Interfaces, vol. 20, no. 4, 74-94, 1990.
- [GLO97] Glover, F. e Laguna M., *Tabu Search* pp. 297 8.9.2 Kluwer Academic Publishers. Massachusetts, 1997.
- [GUR00] Gurgel, F. A., *Logística industrial*, Ed. Atlas, São Paulo SP, 2000
- [HALL88] Hall, R. W., *Excelência na manufatura*, Ed. IMAM, 1988.
- [HAN86] Hansen, P., *The steepest ascent / mildest descent heuristic for combinatorial programming*, trabalho apresentado no Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimization, Capri, Itália, 1986.
- [HAR91] Harmon, R. L. e Peterson, L. D., *Reinventando a fábrica*, Ed. Campus, 1991.
- [HER87] Heragu, S.S. e Kusiak, A., *The facility layout problem*. European Journal of Operational Research 29, 229-251, 1987.

- [HER91] Heragu, S. S., and Kusiak, A., *Efficient Models for the Facility Layout Problem*. European Journal of Operational Research, 53, 1-13, 1991.
- [HER92] Heragu, S.S., *Recent models and techniques for solving the layout problem*. European Journal of Operational Research 57, 136-144, 1992.
- [HOL75] Holland, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1975.
- [KET93] Kettani, Ossama, and Oral, Muhittin, *Reformulating Quadratic Assignment Problems for Efficient Optimization*. IIE Transactions, 25, 97-107, 1993.
- [KIR83] Kirkpatrick, S., Gellat, C. D. Jr, Vecchi, M. P., *Optimization by Simulated Annealing*, Science, vol 220, 671-680, 1983.
- [KOO57] Koopmans, T. C., and Beckman, M., *Assignment Problems and the Location of Economic Activities*. Econometrica, 25, 53, 53-76, 1957.
- [KUS87] Kusiak, .A, Heragu, S. S., *The Facility Layout Problem*. European Journal of Operational Research, 29, 229-251, 1987.
- [LAW63] Lawler, E. L., *The Quadratic Assignment Problem*. Management Science, 9, 586-599, 1963.
- [LEE67] Lee, R.C.; Moore, J.M. *CORELAP - Computerized Relationship Layout Planning*. Industrial Engineering, 18, 195-200, 1967.
- [LEV85] Levary, R. R. and Kalchik, S. *Facilities Layout - a Survey of Procedures*. Computers and Industrial Engineering, 9, 141-148, 1985.
- [MEL96] Meller, Russell D., and Gau, Kai-Yin, *The Facility Layout Recent and Emerging Trends and Perspectives*. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 15, nº 5, pp. 351-366, 1996.
- [MIC94] Microstation, *Manuais do usuário*, 1994.
- [MON90] Montreuil, B., *A modeling framework for integrating layout design and flow network design*, Proceeding of the Material Handling Research Colloquium, Hebron, KY, pp 43-58, 1990.
- [MON93] Montreuil, B., Venkatadri, U., Ratliff, H. D. *Generating a layout from a Design Skeleton*, IIE Transactions, V 25, N 1, 3-15, 1993.
- [MOO74] Moore, E, J.M., *Computer-aided facilities design: an international survey*, Int. J. Prod. Res., V. 12, N. I, pp 21-40, 1974.



- [MUL97] Müller, Felipe M., *Heurísticas e Metaheurísticas*. Anais da V Escola Regional de Informática, Santa Maria, Editado por M. A. Cândia e R. C. Nunes, p. 19-40, 1997.
- [NUG68] Nugent, C. E., Vollmann, T. E. and Ruml, J., *An Experimental Comparison of Techniques for The Assignment of Facilities to Locations*. Operations Research, 16, 150-173, 1968.
- [OLI85] Olivério, J.L., *Projeto da Fábrica*, São Paulo, Instituto Brasileiro do Livro Científico Ltda, 1985.
- [OLI99] Olivier, C.; Cândido, M., *Layout Generation for Agile Manufacturing Systems through Genetic Algorithm Approach*. A General Methodology Framework, 1999.
- [PED91] Pegden, C.D.; Shannon, R.E., *introduction to simulation using SIMAN*, McGraw Hill, 1991.
- [PRO90] Promodel Corporation, *Manuais*, 1990.
- [REE93] Reeves, C. R., *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Halsted Press, New York NY, p127-135, 1993.
- [SCR85] Scriabin, M.; Vergin, R.C. *A cluster-analytic approach to facility layout*. Management Science, 31(1), 33-49, 1985.
- [SLA97] Slack N., Chambers S., Harland C., Harrison A., Johnston R., *Administração da produção*, Ed. Atlas, São Paulo SP, 1997.
- [SUR95] Suresh, G. and Sahu, S. *A genetic algorithm for facility layout*, Int. J. Prod. Res. Vol. 33, no. 12, 3411-3423, 1995.
- [SYS99] Systems Modeling Corporation, *Guide to ARENA*, Standart Edition version 4.0, 1999.
- [SEE67] Seehof, J.M.; Evans, W.O., *Automated layout design program*, Industrial Engineering, 18, 690-695, 1967.
- [TAM91] Tam, K. Y., and Li, S. G., *A Hierarchical Approach to the Facility Layout Problem*, International Journal of Production Research, 29, 165-184, 1991.
- [TAM92] Tam, Kar Yan, *Genetic Algorithms, Function Optimization, and Facility Layout Design*. European Journal of Operational Research, 63, 322-346, 1992.

- [TAM98] Tam K. Y. and Chan S. K., *Solving Facility Layout Problems with Geometric Constraints Using Parallel Genetic Algorithms: Experimentation and Findings*. Int. J. Prod. Res. Vol. 36, no. 12, 3253-3272, 1998.
- [TAT95] Tate, D. M. and Smith, A. E., *A genetic approach to the quadratic assignment problem*. Computers and Operations Research, 32, 73-83, 1995.
- [VOL66] Vollman, T. E. and Buffa, E. S., *Facilities Layout Problem in Perspective*. Management Science, 12, 450-468, 1966.