

KATIANA DA SILVA



**UMA ABORDAGEM HÍBRIDA PARA
FORMAÇÃO DE GRUPOS E BALANCEAMENTO
DE LINHAS DE MONTAGEM SMT**

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: *Sistemas de Computação.*

Orientador: Prof. Dr. Raimundo José Borges de Sampaio.

Co-orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Barbosa Cândido.

CURITIBA

2002




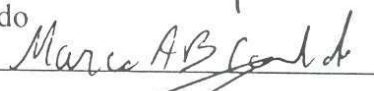
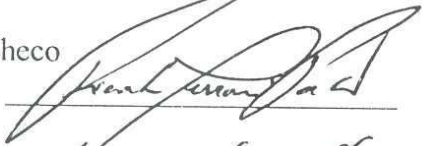



Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada

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 49

Aos 22 dias do mês de fevereiro de 2002 realizou-se a sessão pública de defesa da dissertação “**Uma Abordagem Híbrida para Formação de Grupos e Balanceamento de Linhas de Montagem SMT**”, apresentada por **Katiana da Silva** como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciências**, perante uma Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Raimundo J. B. de Sampaio PUCPR (Presidente)	 _____	<u>APROVADO</u> parecer
Prof. Dr. Marco A. B. Cândido PUCPR	 _____	<u>APROVADO</u>
Prof. Dr. Ricardo Ferrari Pacheco PUCPR	 _____	<u>APROVADO</u>
Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto UFPR	 _____	<u>APROVADO</u>

Conforme as normas regimentais do PPGIA e da PUCPR, o trabalho apresentado foi considerado sem restrição (aprovado sem restrições, aprovado com exigências ou reprovado), segundo a avaliação da maioria dos membros da Banca Examinadora acima indicada.

Observações, exigências e/ou restrições da Banca Examinadora, quando houver:

continuar no verso, se necessário



Prof. Dr. Carlos Alberto Maziero, Diretor
Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada
Pontifícia Universidade Católica do Paraná



Silva, Katiana. Uma abordagem híbrida para formação de grupos e balanceamento de linhas de montagem SMT. Curitiba, 2001. 88p.

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

1. Linhas SMT 2. Formação de Grupos 3. Balanceamento de linha 4. Algoritmo Genético. I. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada
II-t

À minha família, especialmente
ao meu pai - meu eterno mestre.

Agradecimentos

Ao Prof. Raimundo Sampaio, pelo seu apoio e pelos inúmeros ensinamentos que fizeram possível o desenvolvimento dessa dissertação.

Ao Prof. Candido, pela paciência, compreensão e pelos momentos em que por várias vezes repassamos conceitos e conhecimentos importantes para a construção desse trabalho.

À minha mãe, pelo carinho, atenção e pelos momentos em que não estive presente, mas principalmente pela sua amizade que me fortaleceu a continuar nos momentos de desânimo.

Ao meu pai, pela vontade de realização, de sucesso e de aprimoramento constante da vida pessoal e profissional. Meu mestre e querido companheiro de ambições, desejos e esperanças por um futuro sempre melhor.

À minha irmã, que mesmo distante proporcionou-me grande incentivo e confiança.

Ao Paulo, meu irmão de longa data. À minha sobrinha Marina, pela alegria e incentivo de ser criança por toda a eternidade.

Ao Sandro, meu amigo, namorado e companheiro que esteve ao meu lado sempre com enorme paciência e devoção.

À Elaini, pela amizade, companheirismo e fidelidade. Pelos momentos divertidos em que os problemas não existiam. Obrigada pela sua presença compreensiva.

Aos colegas de pesquisa, que deixaram saudades, principalmente à colega Susan, por quem tenho grande estima.

Ao PPGIA, pela oportunidade, credibilidade e disponibilidade de recursos humanos e financeiros, sem os quais seria impossível a realização desse trabalho.

Finalmente, agradeço àqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento dessa dissertação.

Sumário

Agradecimentos.....	i
Sumário.....	ii
Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas.....	iv
Lista de Símbolos.....	v
Lista de Abreviaturas.....	vi
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii

Capítulo 1

Introdução.....	1
1.1. Desafio e motivação.....	2
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Organização do trabalho.....	3

Capítulo 2

Revisão da Literatura.....	4
2.1. Ambiente SMT.....	5
2.1.1. Montagem dos Componentes.....	5
2.1.2. Tempos de Preparação.....	7
2.2 Formação de Grupos	7
2.2.1. Tecnologia de Grupo	9
2.2.2. Formulação do problema	10
2.2.3. Abordagens	12

2.3	Balanceamento de Linha	13
2.3.1	Formulação do problema	15
2.3.2.	Abordagens	16
2.4	Algoritmo Genético	17
2.4.1.	Metodologia dos AGs	18
2.4.1.1.	Representação da solução	18
2.4.1.2.	População inicial	19
2.4.1.3.	Estratégia de solução de indivíduos	19
2.4.1.4.	Operadores genéticos	20
2.4.1.5.	Critério de terminação	21
2.4.1.6.	Função objetivo/decodificação da solução	21
2.4.2.	Fluxo da metodologia	22
2.4.3.	Aplicações de AG em TG	23
2.5.	Conclusão	24

Capítulo 3

Material e Método	26
3.1. Metodologia da solução	26
3.1.1. Representação da solução	27
3.1.2. População inicial	28
3.1.3. Estratégia de seleção de indivíduos	28
3.1.4. Operadores genéticos	29
3.1.5. Critério de terminação	29
3.1.6. Função objetivo/decodificação da solução	29
3.1.7. Síntese da metodologia de formação de grupos	33
3.2. Balanceamento de linha	35
3.2.1. Alocar componentes de precisão	35
3.2.2. Aproximar os tempos de montagem das máquinas	36
3.2.3. Balancear a carga de trabalho	37
3.3. Conclusão	39

Capítulo 4

Resultados	41
4.1. Formação de grupos	42
4.1.1. Parâmetros	45
4.1.2. Comparação dos resultados	46
4.1.3. Novos cenários	49
4.2. Balanceamento de linha	51
4.3. Conclusão	55
Conclusão	56
Referências Bibliográficas	57

Lista de Figuras

Figura 5.1	Fluxo de implementação do AG.....	27
Figura 6.1	Exemplo de uma população de 5 soluções.....	31
Figura 6.2	Algoritmo para decodificação da solução.....	33
Figura 6.3	População inicial.....	34
Figura 6.4	Síntese da metodologia.....	36

Lista de Tabelas

Tabela 6.1	Matriz de Placas <i>versus</i> Componentes.....	34
Tabela 6.2	Tipo e espaço dos componentes.....	34
Tabela 7.1	Cenários de produção.....	44
Tabela 7.2	Comparativo.....	47
Tabela 7.3	Novos cenários de produção.....	49
Tabela 7.4	Formação de grupos com AG.....	50
Tabela 7.5	Cenários para o balanceamento de linha.....	51
Tabela 7.6	Resultado do processo de balanceamento de linha.....	52
Tabela 7.7	Nível de “desbalanceamento”.....	53
Tabela 7.8	Tempos de montagem para cada placa do grupo.....	53

Lista de Abreviaturas

AG	<i>Algoritmo Genético</i>
HBC	<i>Heurística Brochonski e Candido</i>
HK	<i>Heurística Katiana</i>
PCI	<i>Placa de Circuito Impresso</i>
OX	<i>Order crossover</i>
PMX	<i>Partially matched crossover</i>
SMT	<i>Surface Montage Technology</i>
TG	<i>Tecnologia de Grupo</i>

Resumo

A tecnologia SMT (*Surface Montage Technology*) tem sido muito utilizada pela indústria eletrônica na montagem de placas de circuito impresso.

A produção cada vez mais orientada às necessidades do cliente tem causado a redução no tamanho dos lotes de produção, aumentando os custos com a atividade de *setup* das máquinas. A atividade de *setup* envolve inúmeras tarefas manuais como a preparação das máquinas com os componentes, a troca de programas, ajustes de máquinas, etc. Ao contrário da atividade de *setup*, a composição de componentes é totalmente computadorizada e leva segundos para ser completada. Por este motivo, novas abordagens se fazem necessárias para que ocorra o aumento da produtividade nesses ambientes, principalmente no que diz respeito a otimização do tempo de *setup*.

Nesse estudo, as linhas são compostas por m máquinas, sendo uma máquina de precisão e $m-1$ máquinas de velocidade. Restrições tecnológicas das máquinas, como capacidade, velocidade, precisão e outras, além das restrições requeridas pelas placas e componentes, são consideradas. A abordagem proposta consiste de duas fases: a formação de grupos de placas de circuito impresso e o balanceamento da linha de montagem.

Na formação de grupos, o objetivo é formar o menor número de grupos de placas possível, tais que, nenhum *setup* adicional seja necessário para placas de um mesmo grupo. No balanceamento da linha, procura-se distribuir componentes nas máquinas de forma que o tempo de composição entre máquinas seja o mais uniforme possível.

O objetivo final do estudo é propor uma abordagem que maximize a produtividade das linhas SMT, através da formação do menor número de grupos de placas possível e do balanceamento da linha para cada grupo específico.

Palavras-Chave: linhas SMT, formação de grupos, algoritmo genético, balanceamento de linha.

Resumo

A tecnologia SMT (*Surface Montage Technology*) tem sido muito utilizada pela indústria eletrônica na montagem de placas de circuito impresso.

A produção cada vez mais orientada às necessidades do cliente tem causado a redução no tamanho dos lotes de produção, aumentando os custos com a atividade de *setup* das máquinas. A atividade de *setup* envolve inúmeras tarefas manuais como a preparação das máquinas com os componentes, a troca de programas, ajustes de máquinas, etc. Ao contrário da atividade de *setup*, a composição de componentes é totalmente computadorizada e leva segundos para ser completada. Por este motivo, novas abordagens se fazem necessárias para que ocorra o aumento da produtividade nesses ambientes, principalmente no que diz respeito a otimização do tempo de *setup*.

Nesse estudo, as linhas são compostas por m máquinas, sendo uma máquina de precisão e $m-1$ máquinas de velocidade. Restrições tecnológicas das máquinas, como capacidade, velocidade, precisão e outras, além das restrições requeridas pelas placas e componentes, são consideradas. A abordagem proposta consiste de duas fases: a formação de grupos de placas de circuito impresso e o balanceamento da linha de montagem.

Na formação de grupos, o objetivo é formar o menor número de grupos de placas possível, tais que, nenhum *setup* adicional seja necessário para placas de um mesmo grupo. No balanceamento da linha, procura-se distribuir componentes nas máquinas de forma que o tempo de composição entre máquinas seja o mais uniforme possível.

O objetivo final do estudo é propor uma abordagem que maximize a produtividade das linhas SMT, através da formação do menor número de grupos de pacas possível e do balanceamento da linha para cada grupo específico.

Palavras-Chave: linhas SMT, formação de grupos, algoritmo genético, balanceamento de linha.

Abstract

SMT (Surface Montage Technology) assembly lines are gradually replacing conventional printed circuit boards production lines. Manufacturing oriented to the client's specific needs has led to smaller lot sizes and higher setup costs.

This work deals with realistic low-volume high-diversity SMT assembly lines. In such environments, group formation and workload balancing are key factors to increase total line productivity.

The lines considered here are composed of two or more SMT machines. Each machine and its feeder devices have specific technological constraints (capacity, speed, accuracy, etc.). Boards and components constraints are also taken into account.

The approach is composed of two steps: group formation and line balancing. In group formation, we form the minimum number of board groups, such that no additional line setup is required between boards of the same group. A genetic algorithm is applied to group formation. In line balancing, we assign components to machines in order to maximize production rates. An integer mathematical programming approach is adopted to address this problem.

Therefore, the objective of the proposed approach is to maximize productivity of SMT lines by forming the minimum number of board groups and by balancing the SMT line for each group.

Keywords: SMT assembly lines, group formation, genetic algorithm, balance line.

Abstract

SMT (Surface Montage Technology) assembly lines are gradually replacing conventional printed circuit boards production lines. Manufacturing oriented to the client's specific needs has led to smaller lot sizes and higher setup costs.

This work deals with realistic low-volume high-diversity SMT assembly lines. In such environments, group formation and workload balancing are key factors to increase total line productivity.

The lines considered here are composed of two or more SMT machines. Each machine and its feeder devices have specific technological constraints (capacity, speed, accuracy, etc.). Boards and components constraints are also taken into account.

The approach is composed of two steps: group formation and line balancing. In group formation, we form the minimum number of board groups, such that no additional line setup is required between boards of the same group. A genetic algorithm is applied to group formation. In line balancing, we assign components to machines in order to maximize production rates. An integer mathematical programming approach is adopted to address this problem.

Therefore, the objective of the proposed approach is to maximize productivity of SMT lines by forming the minimum number of board groups and by balancing the SMT line for each group.

Keywords: SMT assembly lines, group formation, genetic algorithm, balance line.

Capítulo 1

Introdução

A tecnologia SMT (*Surface Montage Technology*) é utilizada em grande escala na maioria das indústrias eletrônicas no processo de montagem de placas de circuito impresso. A implantação desta tecnologia demanda altos investimentos pois as máquinas são totalmente computadorizadas. Desta forma por questões de amortização de investimentos é que objetivo principal destas indústrias é elevar o nível de produtividade das máquinas. Para que esse objetivo seja alcançado, duas abordagens são propostas: a formação do menor número possível de grupos de placas e o balanceamento de linha.

A formação de grupos utiliza o conceito da Tecnologia de Grupos (TG) para melhoria do processo de produção de lotes de placas de circuito impresso e está centrada em uma filosofia de gerenciamento que identifica e explora a similaridade de uma determinada quantidade de atributos, partindo de um conjunto de objetos. A este conjunto podem pertencer máquinas, produtos, ferramentas ou processos.

Através do uso da TG, produtos semelhantes podem ser produzidos de forma semelhante, reduzindo os custos com preparação ou *setup* das máquinas, além de aumentar consideravelmente os volumes de produção.

O balanceamento de linha, em linhas SMT, se traduz no nivelamento da carga de trabalho das máquinas existentes na linha através da alocação uniforme dos componentes sobre as máquinas. Uma linha balanceada contribui para a redução do tempo ocioso de máquina, aumentando diretamente os níveis de produtividade da linha.

De forma resumida, a proposta desse trabalho apoia-se no uso de algoritmos genéticos e heurísticas construtivas que permitem apresentar abordagens inovadoras para alguns problemas encontrados em linhas de montagem, especificamente às que utilizam a tecnologia SMT em seu processo de montagem.

1.1. Desafio e Motivação

Não somente em indústrias com ambientes de produção do tipo linha de montagem, mas em todos os tipos de indústrias, existem inúmeros problemas que cercam o processo de planejamento da produção e que impedem uma organização de atingir seus objetivos.

No caso específico de linhas de montagem do tipo SMT, altos investimentos são necessários na implementação e manutenção do ambiente. As máquinas SMT são totalmente computadorizadas e por este motivo qualquer intervenção ou atividade manual necessária ao longo do processo produtivo torna-se crítica, se comparada ao tempo que as máquinas levam para compor os componentes. Desta forma, as indústrias buscam elevar cada vez mais seus índices de produtividade, otimizando tais atividades.

Outro fator importante é o perfil atual do mercado. As indústrias para se manterem competitivas no mercado necessitam focar seus produtos às necessidades dos clientes. Isto se traduz em inúmeros novos produtos. Esta diversidade de produtos provoca uma redução no volume dos lotes de fabricação e, conseqüentemente, reduz também os níveis de produtividade desejados.

Como mencionado anteriormente, o ambiente SMT demanda altos investimentos tanto em sua implementação quanto em sua manutenção e, por este motivo, altos índices de produtividade são esperados.

A motivação desse trabalho está em buscar alternativas inovadoras, que auxiliem as indústrias no processo de atingimento dos resultados esperados, principalmente no que se refere ao aumento das taxas de produção.

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é aumentar os níveis de produtividade de linhas de montagem SMT. No entanto, para se alcançar este objetivo, foi necessário o cumprimento de alguns objetivos específicos:

- formar o menor número possível de placas de circuito impresso;
- balancear a linha.

O ambiente de produção em estudo caracteriza-se por uma linha de montagem com m máquinas, sendo uma máquina de precisão, $m-1$ máquinas de velocidade, diversos tipos de placas e componentes. As restrições tecnológicas das máquinas impostas pelos cenários de produção são consideradas, assim como as restrições das placas e componentes.

O conceito de TG é utilizado como metodologia de trabalho no processo de formação de grupos. O Algoritmo Genético foi a técnica escolhida para implementação da formação de grupos, e uma heurística construtiva foi desenvolvida especificamente para o processo de balanceamento da linha.

1.3 Organização do trabalho

Este documento está organizado em sete capítulos. O segundo capítulo consiste na apresentação do ambiente SMT. O terceiro e quarto capítulos consistem na fundamentação prática desse trabalho quando apresenta ao leitor os problemas de formação de grupos e balanceamento de linhas SMT, retratados através de cenários realísticos da indústria eletrônica. O quinto capítulo introduz a técnica de algoritmos genéticos utilizada na formação de grupos de placas. A metodologia utilizada é apresentada no sexto capítulo. Finalmente, no sétimo capítulo são descritos os resultados esperados e as sugestões para trabalhos futuros e no oitavo capítulo, as conclusões.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Desde o final da década de 80 as indústrias têm utilizado a tecnologia SMT (*Surface Montage Technology*) para montagem de placas eletrônicas. O uso desta tecnologia tornou viável a miniaturização dos produtos eletrônicos, o que gerou, conseqüentemente, uma reestruturação das linhas de montagem (Brochonski e Candido 1999).

O objetivo principal de uma linha de montagem SMT é atender as necessidades do mercado com altos índices de produtividade. Isso deve-se ao fato de que a implantação e manutenção dessas linhas demandam altos investimentos. Cada nova atualização de produto requer a atualização das linhas. Com a evolução constante dos produtos e a exigência do mercado em atender cada vez mais as necessidades do cliente, os lotes de produção ficaram cada vez menores. Em linhas de montagem SMT isto significa possuir uma grande diversidade de tipos de placas distribuídas em lotes de produção cada vez menores.

A produção dos lotes exige das linhas SMT muito tempo de preparação das máquinas, e quanto maior o número de lotes de pequenos tamanhos, maior o tempo gasto com preparação ou *setup* das máquinas. Sendo assim, a necessidade de utilização de processos mais ágeis e flexíveis podem contribuir para a redução do número de *setups* de máquinas, e conseqüentemente, para o aumento da produtividade das linhas de uma forma geral. Por isto técnicas inovadoras que permitam renovar os processos de fabricação estão se tornando extremamente importantes para as empresas que desejam garantir competitividade.

Este capítulo apresenta o processo de montagem SMT. Ele introduz não somente o problema do *setup* das máquinas, mas também outros fatores implicantes no processo. Procuramos também ilustrar abordagens que ofereçam a redução do número de *setups* e o aumento da produtividade das linhas.

2.1 Ambiente SMT

2.1.1 Montagem dos Componentes

A montagem de placas eletrônicas em linhas SMT é composta basicamente por três processos (Brochonski e Candido 1999):

1. serigrafia;
2. composição dos componentes;
3. solda.

O processo de serigrafia consiste em passar uma pasta de solda nas ilhas de solda das placas de circuito impresso (PCI). Esta pasta possui duas funções: em um primeiro momento manter o componente preso à placa quando na montagem; e ao final do processo, quando novamente derretida pelo forno de solda esta pasta faz o contato elétrico e a fixação mecânica entre o componente e a PCI.

Assim que a placa passa pela serigrafia, inicia-se o processo de composição dos componentes. Para entender esse processo, alguns conceitos básicos são importantes. Uma linha SMT pode conter diferentes tipos de máquinas de acordo com o produto que se deseja montar. Existem máquinas de alta velocidade com menor precisão, máquinas de alta precisão com menor velocidade e máquinas mistas que possuem ambos requisitos, precisão e velocidade.

Quando uma linha SMT é composta por mais de uma máquina, tempos de espera podem ocorrer quando uma das máquinas termina o ciclo de operação antes da máquina seguinte. Nesse caso, a velocidade da linha será determinada pela máquina mais lenta. Isto introduz o problema de balanceamento em linhas SMT. Alguma abordagem deve ser empregada no sentido de realizar o balanceamento da carga de trabalho entre as máquinas. Com o balanceamento da linha, maiores índices de produtividade podem ser alcançados.

O método de balanceamento em linhas SMT consiste basicamente na alocação uniforme dos componentes em todas as máquinas da linha e, nesse momento, o tempo de montagem do componente deve ser considerado. O tempo de montagem é basicamente constituído pelo número de componentes de cada tipo que a placa necessita, multiplicado pelo tempo que a máquina leva para compor cada componente. Além disto, os componentes devem ser distribuídos nas máquinas de forma que as placas do lote passem por todas as máquinas da linha para que não ocorra a concentração de muitos componentes de uma mesma placa em uma única máquina, prejudicando o balanceamento.

Em ambientes SMT os componentes podem se apresentar sob a forma de fitas ou à granel. As fitas são enroladas em carretéis que são montados em dispositivos mecânicos chamados alimentadores. Por sua vez, os alimentadores, dispostos em mesas alimentadoras, podem ocupar na mesa mais de um "slot" de 8 mm dependendo basicamente do tipo e largura do componente. O alimentador, quando fixo nas mesas, permite que o componente esteja preparado para a montagem. A capacidade de uma máquina é medida pela quantidade de alimentadores que a mesa pode comportar.

A alimentação de placas nas máquinas de composição SMT pode ser manual ou automática. A forma automática permite que as placas entrem na máquina através de esteiras provenientes da máquina de serigrafia. A forma manual é feita por um operador que retira a PCI da serigrafia e alimenta as máquinas.

O programa de montagem da PCI informa à máquina quais componentes montar, as coordenadas X, Y, Z onde o componente deve ser posicionado e em quais mesas e alimentadores (direita e/ou esquerda) o componente está localizado. Com estas informações o cabeçote se desloca até o alimentador de componentes, apanha o componente, transporta-o até a placa, e realiza a montagem. Este processo se repete até que a placa esteja com todos os componentes necessários.

Ao sair da máquina de montagem a PCI segue até o forno de refusão, que fará a soldagem. O forno é dividido em várias zonas de temperatura. A placa entra no forno com a temperatura ambiente e vai sendo aquecida até o ponto de fusão do estanho. A placa é então resfriada, saindo do forno com temperatura próxima da ambiente. Ao sair do forno a placa está formada com todos os seus componentes soldados.

2.1.2 Tempos de preparação

A preparação das máquinas ou tempo de *setup* ocorre toda vez que uma linha deixa de montar um tipo de produto específico, para iniciar a montagem de um novo produto. Em síntese, é o tempo entre a última peça boa de um produto específico até a primeira peça boa de outro produto. Nesse tempo, as mesas alimentadoras são preparadas com os componentes necessários para a fabricação deste novo produto, sendo que nessa etapa, a atividade principal é a alocação dos componentes sob as mesas. Durante a preparação da linha, ela pode permanecer ociosa.

Além dessa atividade, outros processos fazem parte do *setup* das máquinas segundo Brochonski e Candido (1999), tais como: a troca de alimentadores nas mesas, a troca de programas, ajustes de máquinas, troca das mesas alimentadoras e inspeção da primeira peça produzida.

A diferença entre a execução das atividades de *setup* e o respectivo tempo de composição dos componentes na placa representa uma grande discrepância. Quando os volumes de produção de um mesmo produto são grandes, o tempo de *setup* não possui grande relevância, mas caso contrário, onde os lotes são pequenos, a diferença entre o tempo de *setup* e o tempo de montagem das placas se mostra significativamente evidente. Esse problema é bastante conhecido em linhas SMT. Algumas técnicas, quando empregadas, podem resultar na redução do tempo de *setup*. Por exemplo: **linhas SMT fixas**, as quais produzem somente uma família de produtos utilizando um único *setup* e um mesmo tempo de composição de componentes; **a preparação offline** que significa produzir um lote enquanto outro está sendo preparado; um terceiro tipo seria a **formação de grupos de PCI**, onde placas de um mesmo grupo exigem somente um único *setup*. Esse estudo propõe uma abordagem para formação de grupos de PCI.

2.2 Formação de Grupos

O alto custo com a implantação e manutenção das linhas SMT demandam altos investimentos. Isto caracteriza um dos principais objetivos desses ambientes que é a busca pela maximização das taxas de produção para que ocorra, principalmente, o retorno financeiro do investimento.

Diante deste cenário, as atividades envolvidas no processo de produção, além dos problemas encontrados ao longo de todo processo, exigem uma grande concentração de esforços

no sentido de otimização e aplicação de técnicas inovadoras que contribuam cada vez mais para o aumento das taxas de produção. Isto tem despertado o interesse de muitos pesquisadores. Um grande número de trabalhos sobre otimização em linhas de montagem foram apresentados nos últimos anos, principalmente porque a tecnologia SMT é nova e tem grande potencial de crescimento (Brochonski e Candido 1999).

A formação de grupos, dentro desse contexto, é um fator relevante que contribui para aumentar os níveis de produtividade das linhas de montagem da seguinte forma: quanto maior o número de produtos que agrupados podem ser processados de forma semelhante com um único *setup*, maior é o volume de produção, e menor é o custo gasto com *setups* na linha.

Toda linha de montagem, para processar um produto ou um grupo de produtos, necessita ser preparada com ferramentas, recursos e materiais necessários. Este tempo de preparação, ou tempo de *setup*, pode exigir que a linha esteja ociosa. Em linhas de montagem que possuam uma grande diversidade de produtos com baixo volume de produção, os *setups* se mostram como processos extremamente críticos, pois requerem horas de atividade, enquanto que a montagem do produto propriamente dita, somente segundos.

O custo de composição dos componentes em sistemas com esta característica é calculado através do tempo de montagem do produto, mais o tempo em que a linha permanece ociosa. Portanto, a redução do tempo de *setup* ou do número de *setups* necessários para produção de um determinado lote, reduz em grande monta os gastos com a montagem do produto de uma forma geral, além de aumentar diretamente os índices de produtividade do ambiente de produção como um todo.

Uma empresa para manter-se competitiva necessita cada vez mais atender as necessidades do cliente. Como já mencionado anteriormente, isto acaba diversificando os produtos e reduzindo intensivamente o tamanho dos lotes de produção.

Um processo eficaz de formação de grupos de produtos semelhantes, neste caso, pode contribuir para a redução do número de *setups* necessários, pois requer apenas um único evento para produtos de um mesmo grupo, contribuindo no aumento do volume de produção. O número de grupos formados será diretamente proporcional ao número de *setups* necessários.

Dentro desse contexto, a Tecnologia de Grupo tem sido explorada como um importante princípio científico para melhoria desse processo em sistemas de manufatura (Seifoddini e Wolfe 1986).

2.2.1 Tecnologia de Grupo

Tecnologia de Grupo (TG), segundo Nair e Narendran 1998, é uma filosofia de gerenciamento que identifica e explora a similaridade de uma determinada quantidade de atributos, partindo de um conjunto de objetos. A este conjunto podem pertencer máquinas, produtos, ferramentas ou processos. A estratégia é processar famílias de produtos através de uma célula (linha de montagem), com poucas máquinas e processos dedicados, afim de ganhar vantagens sobre o tempo total de produção, sobre o aumento do volume de produção, tempo de manuseio de materiais e estoques em processo (Venugopal e Narendran 1992).

A TG foi proposta por Mitrofanov (1966) e foi propagada por Burbidge (1970), o qual desenvolveu vários métodos heurísticos para solucionar o problema, dentre eles, *Production Flow Analysis* (PFA).

A principal abordagem da TG está na identificação de famílias ou grupos de produtos. Para identificar grupos de produtos, três abordagens têm sido apresentadas nos últimos anos (Suresh e Kay 1998):

- uso de classificação e codificação;
- uso de abordagens que analisam o processo de produção com objetivo de identificar grupos de produtos;
- abordagens visuais intuitivas.

O sistema de codificação é responsável por caracterizar o produto quanto a sua forma, tamanho, tipo de material, características técnicas, e processos de fabricação. Desta forma, o engenheiro projetista, por exemplo, pode aplicar a TG como uma tentativa para padronização de produtos e processos. O projeto de um novo produto inicia-se então pela possível recuperação de outros projetos similares, ou seja, famílias de produtos que possuam as mesmas características e necessidades de produção.

Uma vez finalizada a codificação, através do método de classificação, se formarão famílias de produtos com base em seus aspectos semelhantes. Estas famílias serão produzidas em linhas de montagem específicas, configuradas conforme suas necessidades.

O segundo método para identificação de grupos de produtos é baseado na análise direta do processo de produção sem contar com a utilização de recursos como a classificação e a codificação. Esse método tem sido utilizado por muitos pioneiros em TG, principalmente por Burbidge. O método PFA (*Production Flow Analysis*) desenvolvido por Burbidge (1963) é um exemplo de aplicação dessa abordagem.

O terceiro método de análise intuitiva tem sido utilizada nas organizações através da identificação visual de grupos de produtos e a posterior criação de células de máquinas orientadas à produção de cada grupo identificado.

O leitor poderá encontrar mais detalhes sobre estes métodos em [Suresh e Kay 1998], [Askin 1993] e [Kumar et al. 1986].

2.2.2 Formulação do Problema

O objetivo desta seção é introduzir o problema de formação de grupos de produtos. Para se compreender o problema faz-se necessário formalizar sua definição. O cenário escolhido é formado por inúmeras máquinas, uma variedade de tipos de placas distintas e um grande número de tipos de componentes.

A abordagem que será apresentada está inserida em um modelo que consiste de um sistema de produção do tipo linha de montagem de placas de circuito impresso que utilizam tecnologia SMT para montagem dos componentes. No modelo que será apresentado, os autores Askin e Vakharia (1994) formalizam o problema de formação de grupos de placas da mesma forma que propõe a alocação dos componentes nas máquinas.

Algumas variáveis fazem parte do cenário do problema: i , j , k e g e referem-se respectivamente à máquinas, placas, tipos de componentes e subfamílias (grupos).

Seja t_{jk} o tempo total para montagem da placa j , através da alocação de todos os seus k tipos de componentes. Seguem as variáveis de decisão:

$$X_{jg} = \begin{cases} 1 & \text{se placa } j \text{ for incluída no grupo } g \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$Y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{máquina } i \text{ recebe o componente do tipo } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.2)$$

A função objetivo foi descrita de forma a minimizar a combinação entre o tempo máximo de processamento não balanceado (δ_1) e a carga máxima de trabalho suportada pela máquina (δ_2).

O parâmetro α pode variar entre 0 e 1:

$$\text{minimize } Z = \alpha\delta_1 + (1-\alpha)\delta_2 \quad (3.3)$$

sujeito a,

$$p_{ji} = \sum_{k=1}^K t_{jk} Y_{ik} \quad \forall i \text{ e } j \quad (3.4)$$

$$\sum_{j=1}^J p_{ji} \leq \delta_2 \quad \forall i \quad (3.5)$$

$$\sum_{g=1}^G X_{jg} = 1 \quad \forall j \quad (3.6)$$

$$\bar{p}_{gi} = \frac{\sum_{j=1}^J X_{jg} p_{ji}}{\sum_{j=1}^J X_{jg}} \quad \forall g \text{ e } i \quad (3.7)$$

$$p_{ji} - \sum_{g=1}^G \bar{p}_{gi} X_{jg} \leq \delta_1 \quad \forall j \text{ e } i \quad (3.8)$$

$$p_{ji} - \sum_{g=1}^G \bar{p}_{gi} X_{jg} \geq -\delta_1 \quad \forall j \text{ e } i \quad (3.9)$$

$$\sum_{i=1}^I Y_{ik} = 1 \quad \forall k \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1}^K f_k Y_{ik} \leq S_i \quad \forall i \quad (3.11)$$

A restrição 3.4 define o tempo de montagem da placa j na máquina i , através do somatório dos tempos de montagem dos componentes atribuídos à máquina i . Leva-se em consideração os componentes que a placa requer em sua montagem. A restrição 3.5 fixa a carga máxima de trabalho para as máquinas. A restrição 3.6 determina a atribuição da placa em um único grupo. A

restrição 3.7 determina o tempo médio para processamento da subfamília g na máquina i , que será usado como base para medir o nível de desbalanceamento nas máquinas. As restrições 3.8 e 3.9 comparam a variável δ_1 com o resultado da diferença entre o tempo de processamento das placas nas máquinas e o tempo de processamento do grupo, de forma a medir o desbalanceamento dos grupos. A restrição 3.10 determina que cada componente deve ser atribuído para uma única máquina. A restrição 3.11 estabelece que o número de componentes atribuídos para uma máquina, seja menor ou igual a capacidade disponível de cada máquina.

Utilizando este modelo, os autores sugerem em primeiro plano, a atribuição dos componentes às máquinas e em segundo lugar a formação de grupos. Isto porque, na visão do autor, os grupos não podem ser claramente analisados a menos que a atribuição dos componentes seja conhecida; ao contrário do balanceamento de linha, que pode ser feito sem o conhecimento dos grupos (somente com a atribuição dos componentes).

2.2.3 Abordagens

Neste capítulo introduzimos o conceito de Tecnologia de Grupo (TG) como um importante princípio científico utilizado pelos sistemas de manufatura, na busca de soluções para o problema de formação de grupos.

A partir da década de 60 muitos métodos foram apresentados com o objetivo de tratar o problema de formação de grupos de produtos e de células de máquinas. Segundo Nair e Narendran (1998), muitos desses métodos utilizam o método da matriz incidente de máquinas *versus* componentes, cujo resultado é o arranjo entre grupos de produtos e respectivas células de máquinas orientadas a produção dos grupos. Na prática, este arranjo perfeito nem sempre é possível, pois quanto maior a complexidade do cenário de produção maior a dificuldade do reconhecimento e, portanto, técnicas mais aprimoradas de formação de grupos se fazem necessárias quando para ambientes mais arrojados que possuam cenários mais complexos.

Nesse trabalho, a TG é utilizada para agrupar placas com componentes similares. Placas de um mesmo grupo não necessitam de *setups* adicionais, pois requerem os mesmos processos de fabricação e as mesmas máquinas. Desta forma é possível reduzir o número de *setups* e aumentar o volume de produção. O trabalho desenvolvido por Brochonski e Candido (1999) foi utilizado como referência nesse estudo. O cenário estudado pelos autores possuía uma linha de montagem

com uma única máquina, placas e componentes diversos. Um componente pode ocupar somente um slot de 8 mm na mesa alimentadora. O escopo do trabalho prevê a formação de grupos de placas e em seguida a programação finita da produção. Destacando o método de formação de grupos de placas, os autores utilizaram o cálculo do Coeficiente de Jaccard e em seguida uma heurística para formação dos grupos de placas. O processo inicia-se com a montagem de uma matriz de similaridade formada através do cálculo do Coeficiente de Jaccard. Essa matriz de similaridade é organizada em ordem decrescente do nível de similaridade e o processo de formação de grupos inicia com o primeiro par de placas, no topo da matriz. Cada máquina possui uma capacidade máxima de alimentadores que pode comportar, ou seja, um certo número de componentes que podem ser alocados. A partir da matriz de similaridade, inicia-se o processo de formação de grupos : para cada par de placas similares, calcula-se o número de alimentadores necessários. Caso o valor não exceda a capacidade da máquina, faz-se novo cálculo de similaridade para encontrar outra placa similar ao par que também possa ser inserida no mesmo grupo. Quando a capacidade é excedida, abre-se novo grupo. O processo se repete até que todas as placas tenham sido agrupadas.

Nesse estudo, a diferença está no cenário que foi ampliado de forma a atingir uma maior variedade de tipos de ambientes de produção.

O leitor poderá encontrar em [Seifoddini e Wolfe, 1986], [Chandrasekharan e Rajagopalan, 1987] e [King e Nakornchai, 1982] utilizações da TG em ambientes de manufatura para a formação de grupos de produtos e células de máquinas.

2.3 Balanceamento de Linha

O objetivo principal de uma linha de montagem é executar um conjunto distinto de tarefas para a montagem de um produto ou de uma família de produtos. Uma linha de montagem consiste em um grupo de estações de trabalho conectadas por meio de um sistema de transporte contínuo de materiais. Uma especificação detalhada sobre a ordem de execução das tarefas é parcialmente pré-determinada e utilizada para a correta montagem do produto final.

Tarefa é a menor unidade de esforço, ou seja, é uma atividade que agrega valor e que não pode ser subdividida entre duas ou mais estações.

Estação é uma localização dentro do fluxo de montagem da linha onde um subconjunto de tarefas são processadas.

As estações exigem sempre um tempo de preparação antes da entrada do produto na linha. Esse tempo é denominado tempo de *setup*. É nesse tempo que cada estação é preparada com ferramentas e materiais necessários para montagem de um produto ou de um grupo de produtos, além da configuração do *softwares* das máquinas e do planejamento dos recursos necessários.

O produto percorre cada uma das estações onde são processados um subconjunto de tarefas. Quando a linha de montagem é composta por mais de uma máquina, a que determinará a velocidade da linha será sempre a mais lenta. Por este motivo, faz-se necessário o balanceamento da carga de trabalho entre as máquinas.

Na linha, as estações nas quais o produto permanece por um maior espaço de tempo, são denominadas **estações de trabalho gargalo**. Em ambientes SMT o somatório dos tempos de processamento das tarefas na estação de trabalho gargalo é denominado tempo de ciclo (tempo de concluir uma unidade do produto).

A seqüência de execução das tarefas nas estações é parcialmente pré-determinada porque relações de precedência poderão ser utilizadas de maneira a impor restrições tanto na seqüência de execução entre elas, como no agrupamento das tarefas nas estações. Por exemplo: partindo de um conjunto de tarefas, a tarefa “A” só poderá iniciar depois que a tarefa “C” tenha sido processada, ou, numa mesma estação de trabalho não poderão ser agrupadas as tarefas “A” e “D”. O fato de serem parcialmente pré-determinadas, significa que uma tarefa pode ou não ter uma restrição em sua forma de execução ou agrupamento.

Sempre que uma linha de montagem estiver operando, é ideal que todas as suas estações se mantenham ocupadas (Askin 1993). Isto sugere uma distribuição uniforme das tarefas nas estações. Quando o fluxo de trabalho na linha é constante em todas as estações, temos uma linha de montagem balanceada.

Uma linha balanceada gera inúmeros benefícios, pois reduz o tempo ocioso das estações, proporciona aumento do volume de produção e redução dos custos com a montagem dos produtos. Este cenário tem despertado o interesse de inúmeros pesquisadores em estudar o problema de balanceamento de linha desde as últimas décadas. Esse tema está sendo abordado

neste trabalho através da utilização de técnicas inovadoras em um ambiente de produção de uma indústria eletrônica.

2.3.1 Formulação do Problema

Abaixo apresentamos uma formulação matemática do problema de balanceamento de linha, descrita em Askin (1993). O objetivo principal do autor nesse caso é minimizar o número de estações de trabalho necessárias e, para isto, ele procura ocupar as estações de trabalho com a máxima carga possível. As restrições do problema estão concentradas na taxa de produção, na seqüência e no agrupamento das tarefas nas estações.

O tempo de ciclo neste caso específico é o tempo total de montagem de uma unidade do produto e, como são consideradas linhas de montagem paralelas, denominou-se $C=m/P$ como sendo o tempo de processamento de uma unidade do produto - C é o tempo de ciclo, m a quantidade de linhas paralelas e P a quantidade do produto. O tempo para execução da tarefa i foi denotado como t_i . As tarefas possuem sua ordem de execução parcialmente pré-determinadas. Sendo assim tem-se:

- o conjunto TP determina o conjunto das tarefas predecessoras;
- TU , o conjunto dos pares de tarefas que podem ser atribuídas a uma mesma estação;
- TN , o conjunto dos pares de tarefas que não podem ser atribuídas a uma mesma estação.

Para formular o problema de otimização, foram utilizados indicadores binários como variáveis de decisão. Estas variáveis indicam quando a tarefa i é atribuída à estação k ,

$$X_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se a tarefa } i \text{ é atribuída à estação } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K c_{ik} X_{ik} \quad (4.2)$$

sujeito a,

$$\sum_{i=1}^N t_i X_{ik} \leq C \quad k = 1, \dots, K \quad (4.3)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (4.4)$$

$$X_{vh} \leq \sum_{j=1}^h X_{uj} \quad h = 1, \dots, K \quad (u, v) \in IP \quad (4.5)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{uk} X_{vk} = 1 \quad (u, v) \in ZS \quad (4.6)$$

$$X_{uh} + X_{vh} \leq 1 \quad k = 1, \dots, K \quad (u, v) \in ZD \quad (4.7)$$

$$X_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \quad \forall k \quad (4.8)$$

$$Nc_{ik} \leq c_{i,k+1} \quad k = 1, \dots, K-1 \quad (4.9)$$

Neste cenário são permitidos um grande número K de estações. De forma a garantir o objetivo de minimizar o número de estações necessárias, definiu-se um coeficiente de custo (4.9) que objetiva “forçar” a atribuição de um grande número de tarefas a uma mesma estação de trabalho, ou seja, uma nova estação somente será aberta quando não houver mais artifícios nem recursos para alocar mais tarefas nas estações já existentes.

A restrição 4.3 procura garantir que o somatório dos tempos de execução do conjunto de tarefas não exceda o tempo total de processamento do ciclo. A restrição 4.5 assegura que uma tarefa seja atribuída somente para uma única estação na linha de montagem.

As relações de precedência entre as tarefas são manipuladas pela restrição 4.6. A restrição 4.7 determina quando um par de tarefas (u, v) deverá ser atribuída a uma mesma estação de trabalho e a restrição 4.8, determina quando um par de tarefas (u, v) não poderá ser atribuída a uma mesma estação de trabalho.

2.3.2 Abordagens

Existem várias abordagens propostas para solucionar o problema de balanceamento de linhas, entre elas as abordagens ótimas e as abordagens aproximadas.

As abordagens ótimas são utilizadas em problemas de pequeno porte devido a inerente intratabilidade do problema de balanceamento – NP completo. Como métodos ótimos destacam-se os algoritmos *branch and bound* e a programação dinâmica.

A técnica *branch and bound* (dividir e conquistar) objetiva obter uma solução ótima para um problema de programação inteira ou mista. O problema original é sucessivamente dividido em problemas menores que passam a ser *conquistados* (Askin 1993).

De forma semelhante, a programação dinâmica procura dividir o problema em estágios. Para cada estágio uma decisão deverá ser tomada. A solução ótima é obtida através do resultado de uma seqüência de decisões localmente ótimas.

Para problemas de grande porte, nos quais não é possível utilizar uma abordagem ótima, as abordagens aproximadas são utilizadas. Dentre as abordagens aproximadas, há métodos construtivos e métodos de melhoramento. Essas abordagens não visam a obtenção de uma solução ótima, mas apresentam bons resultados em um tempo computacional razoável.

Dentre as técnicas construtivas pode-se citar os métodos CONSOAL e RPW que basicamente da seguinte forma: um conjunto de tarefas é agrupado em subconjuntos menores que serão distribuídos nas estações de trabalho da linha. O agrupamento de tarefas somente é possível quando o somatório do tempo de execução de todas elas não excede o tempo de ciclo ou tempo disponível em cada estação de trabalho. Além disto, o método RPW (*Ranked Positional Weight*) propõe um peso para cada tarefa, que é utilizado no momento de alocar a tarefa à estação de trabalho (Askin 1993).

Dentre os métodos de melhoramento destaca-se os algoritmos genéticos pois foram empregados com sucesso em uma grande variedade de problemas de otimização, principalmente em problemas combinatoriais (Suresh e Kay 1998). Dentre alguns trabalhos destacam-se: [Joines et al. 1996], [Venegopal e Narendran 1992] e [Daskin 1991].

2.4 Algoritmo Genético

Segundo Tonomaru (1995), os Algoritmos Genéticos (AG) pertencem a classe dos métodos probabilísticos de busca e otimização. São métodos computacionais, baseados no mecanismo de evolução natural e da genética.

Os AGs tem sido usados com sucesso na resolução de um grande número de problemas de otimização, principalmente problemas combinatoriais (Joines et al 1996).

Devido ao fato do problema de formação de grupos ser um problema NP-completo (Lenstra 1974; Kusiak e Vannelli 1986; Venugopal e Narendran 1992b), algoritmos de pesquisa como os AGs oferecem resultados promissores. Isto por causa de sua natureza estocástica que permite escapar de mínimos locais porque é possível ampliar a busca no espaço de soluções podendo assim proporcionar soluções melhores - ótimas ou próximas do ótimo.

O objetivo desse estudo é utilizar AG no problema de formação de grupos de placas. O problema de formação de grupos de produtos com a utilização de AG, especificamente se tratando de sistemas de linha de Montagens SMT, não foi encontrado na literatura.

2.4.1 Metodologia dos AGs

Em AGs, uma população de possíveis soluções para o problema evolui de acordo com operadores probabilísticos, de modo que há uma tendência de que, em média, indivíduos representam soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua.

Ao contrário de outros métodos probabilísticos que partem de uma única solução que é melhorada sucessivamente, os AGs escapam de mínimos locais à medida que exploram todo o espaço de pesquisa. Para isto utilizam-se de operadores probabilísticos como mutação, *crossover* e seleção.

Seis pontos importantes são destacados nesse trabalho quanto ao uso de AG:

1. a representação da população.
2. a geração da população inicial.
3. a estratégia de seleção de indivíduos.
4. a utilização de operadores genéticos.
5. o critério de terminação.
6. escolha da função objetivo/decodificação da solução.

A seguir descreveremos com mais detalhes cada um desses pontos.

2.4.1.1 Representação da solução

Em AG, a representação da solução requer que cada indivíduo da população, ou seja, uma possível solução, seja descrito ou codificado como uma seqüência de símbolos a partir de um alfabeto finito. Um alfabeto pode consistir de dígitos binários (0 e 1), inteiros, matrizes, símbolos (A, B, C...), etc. Cada indivíduo (seqüência de símbolos) corresponde a um cromossomo e cada elemento da seqüência é equivalente a um gene. O valor que um gene pode assumir é denominado alelo.

2.4.1.2 População inicial

Toda implementação de AG necessita da inicialização de uma população. Isto significa gerar possíveis soluções para o problema a partir da escolha da representação cromossômica.

O AG possui a funcionalidade de sempre aprimorar as soluções existentes. Sendo assim, a população inicial pode possuir indivíduos (possíveis soluções) obtidos em outros algoritmos de formação de grupos de placas ou soluções previamente existentes obtidas por outros métodos. O importante está na tentativa de conseguir alcançar resultados melhores que os então conhecidos. O método mais comum para geração da população inicial é a geração randômica dos indivíduos.

2.4.1.3 Estratégia de seleção de indivíduos

Pode-se dizer que a seleção de indivíduos para reprodução seja um dos itens mais importantes em AG. O objetivo está em permitir que indivíduos com melhor *fitness* permaneçam ou se reproduzam repassando material genético de boa qualidade para as próximas gerações. Devido ao fato do AG ser um método totalmente probabilístico, todos os indivíduos têm chances de serem escolhidos para as próximas gerações; de qualquer forma, indivíduos que possuem maior *fitness* tem uma probabilidade maior de serem selecionados.

Os métodos mais conhecidos de seleção de indivíduos são: técnicas de escalonamento, métodos de ranking, elitismo, seleção por torneio e método da roleta (Joines et al 1996).

O método do torneio consiste em um processo totalmente aleatório. Gera-se dois números randômicos que definem a posição de dois indivíduos na população (indivíduo 1, indivíduo 2, etc.), aquele que possuir melhor *fitness* será selecionado para reprodução.

O leitor poderá encontrar maiores detalhes sobre os demais métodos de seleção em Joines et al (1996) e Tanomaru (1995).

2.4.1.4 Operadores Genéticos

Após a seleção dos indivíduos, emprega-se a aplicação dos operadores de mutação e *crossover* para geração de uma nova população.

A execução dos operadores ocorrem em nível de indivíduo no caso da mutação e em pares de indivíduos no caso do *crossover*, mas somente serão executados mediante uma operação probabilística assim definida: primeiramente duas taxas devem ser pré-determinadas, a taxa para execução da mutação e a taxa para execução do *crossover*. Após seleção dos indivíduos, um número aleatório é gerado. Se este número for menor ou igual a taxa de mutação, a mutação será aplicada no indivíduo. Da mesma forma para a execução do *crossover*, gera-se um número aleatório e caso este número for menor ou igual a taxa de *crossover* pré-determinada, o *crossover* será aplicado no par de indivíduos selecionados. Não existe hoje nenhum valor padrão para as taxas de mutação e *crossover*, esses valores dependem totalmente de experimentos realizados para os problemas em questão.

O processo de mutação ocorre da seguinte forma: seleciona-se duas posições no cromossomo (dois genes) e inverte-se os valores de seus genes.

O processo de *crossover* envolve um par de indivíduos e consiste na troca de fragmentos entre os pares de cromossomos. Os principais tipos de *crossovers* existentes são: PMX (“*Partially Matched Crossover*”), OX (“*Order Crossover*”) e “*Cycle*”. Nesse estudo, após inúmeros testes, observou-se melhores resultados com o *crossover* PMX.

O processo PMX utiliza um corte em dois pontos de cada par de indivíduos. Suponha o seguinte par de indivíduos (A,B) representados por uma seqüência de números inteiros:

1	2	3	4	5	A
4	5	1	2	3	B

Os genes que estão dentro do ponto de corte sofrem uma inversão, ou seja, a seqüência do indivíduo A, seqüência {2 3}, passa a pertencer ao novo indivíduo C e a seqüência do indivíduo B, seqüência {5 1} ao indivíduo D:

1	2	3	4	5	A
4	5	1	2	3	B

$$\begin{array}{c} - \\ - \end{array} \left| \begin{array}{cc} 5 & 1 \\ 2 & 3 \end{array} \right| \begin{array}{c} - \\ - \end{array} \begin{array}{c} C \\ D \end{array}$$

Segue-se a regra para preenchimento dos demais genes no novo par de indivíduos e pergunta-se: o gene de valor 1 do indivíduo A pertence a seqüência {5 1} já alocada no indivíduo C? Caso a resposta seja *sim*, ao invés de alocar o valor 1, aloca-se seu valor correspondente pertencente ao cromossomo D, ou seja, o valor 3. Se isto não ocorresse, o indivíduo C possuiria dois valores 1, o que seria totalmente incorreto. Se a resposta a pergunta for *não*, ou seja o valor não pertence a seqüência em questão {5 1}, o valor 1 do indivíduo A seria alocado no novo indivíduo. Este procedimento será continuado até que todos os genes do cromossomo C estejam preenchidos e da mesma forma ocorreria para preenchimentos dos genes do novo indivíduo D (neste caso toma-se como base os genes do ponto de corte já alocados no indivíduo B). Após os dois novos indivíduos C e D serem formados, ambos pertencerão a nova população.

O resultado, ou seja, os dois novos indivíduos C e D ficariam assim determinados:

$$\begin{array}{c} 3 \\ 4 \end{array} \left| \begin{array}{cc} 5 & 1 \\ 2 & 3 \end{array} \right| \begin{array}{cc} 4 & 2 \\ 5 & 1 \end{array} \begin{array}{c} C \\ D \end{array}$$

2.4.1.5 Critério de terminação

Inúmeros critérios de terminação podem ser utilizados com AGs, por exemplo, um número específico de gerações, a constatação da convergência dos resultados (obtenção de uma única solução repetidamente), estagnação dos resultados após um determinado número de gerações, etc. Da mesma forma que nos itens anteriores, o critério de terminação depende exclusivamente do tipo do problema que está sendo trabalhado e deve ser analisado cuidadosamente através da execução de testes que definam a melhor escolha. Estes testes podem ser feitos variando o número de gerações ou observando a convergência dos resultados partindo de um número elevado de gerações.

2.4.1.6 Função objetivo/decodificação da solução

A função objetivo deve retratar a definição do que é o valor de uma solução para o problema. No caso da formação de grupos de placas, um indivíduo representa uma seqüência de

placas, que após trabalhadas devem gerar um determinado número de grupos. O número de grupos seria, nesse caso, a função objetivo para o problema.

2.4.2 Fluxo da metodologia

A figura abaixo ilustra um resumo de toda metodologia dos AGs e procura dar uma visão computacional:

- total gerações = G
- geração = 0
- indivíduos = N
- Gerar a população inicial de soluções utilizando métodos randômicos
- Enquanto um determinado critério de parada não for satisfeito, faça:
 - De $j = 1$ até N, faça
 - Determinar o valor do *fitness* para Pop(j) através da aplicação de uma função objetivo
 - Decodificar e avaliar os N indivíduos da população
 - Guardar a melhor solução (melhor *fitness*)
 - Gerar uma nova população Pop(geração + 1) a partir da população atual
 - Selecionar X indivíduos da população atual
 - De $k = 1$ até (X-1) incrementando 2 em k, faça
 - Se número randômico < tx_c
 - então aplicar *crossover* no par Pop(k) e Pop(k+1)
 - senão copiar o par de indivíduos na nova população
 - De $k = 1$ até X, faça
 - Se número randômico < tx_m
 - então aplicar mutação em Pop(k)
 - senão copiar o indivíduo na nova população
 - Aplica elitismo na nova população, caso a mutação tenha sido executada
 - Incrementa +1 em geração
- Decodificar a melhor solução entre todas as gerações

Figura 5.1: Fluxo de implementação do AG

2.4.3 Aplicações de AG em TG

Muitos pesquisadores têm aplicado AG em problemas de manufatura celular nos últimos anos. Segundo Joines et al. (1996c, 1996b) estes estudos dividem-se em duas categorias: AG na resolução de problemas de programação inteira; e aqueles que determinam a melhor permutação

de máquinas e/ou produtos. Joines et al. (1996c, 1996b) desenvolveu uma abordagem utilizando AG para resolver o problema de formação celular (células de máquinas).

Venugopal e Narendran (1992a) usaram AG para resolver uma formulação matemática inteira multi-objetiva para o problema de formação celular na tentativa de minimizar a movimentação de materiais entre as estações de uma linha de montagem. Entre outros pesquisadores pode-se destacar: Gupta et al. (1995), Kazerooni et al (1996), Daskin (1991) e Billo et al (1994). Esses pesquisadores têm alcançado ótimos resultados no que diz respeito a formação celular de máquinas e grupos de produtos.

2.5 Conclusão

O objetivo desse capítulo foi introduzir o ambiente de produção, utilizado como referência nesse estudo. Dois principais problemas foram destacados no que diz respeito a composição de PCI em linhas SMT: o tempo de *setup* das máquinas e o balanceamento da linha.

A redução dos tempos de *setup* através da formação de grupos e o aumento dos índices de produtividade da linha através do balanceamento de suas etapas são itens abordados nesse trabalho.

A formação de grupos de produtos pode proporcionar a redução do número de *setups* e o aumento do volume de produção quando reúne produtos semelhantes que utilizam os mesmos processos de fabricação, as mesmas máquinas e, portanto não necessitam de *setups* adicionais para produtos de um mesmo grupo. Em sua maioria, este problema é tratado com o uso da Tecnologia de Grupo como filosofia de gerenciamento, que identifica e explora uma mesma quantidade de atributos, partindo de um conjunto de objetos.

O uso da TG no tratamento da formação de grupos de produtos pode ser encontrada em trabalhos como [Brochonski e Candido 1999], [Seifoddini e Wolfe, 1986], [Chandrasekharan e Rajagopalan, 1987] e [King e Nakornchai, 1982].

As linhas de montagem objetivam executar um conjunto de tarefas distintas para a montagem de um único produto ou de um grupo de produtos. Uma linha não balanceada significa baixos volumes de produção, muito tempo ocioso de máquina e conseqüentemente pouco aproveitamento da produtividade da linha de uma forma geral. Devido a isto, inúmeros pesquisadores vêm estudando esse problema ao longo dos anos, atingindo bons resultados.

Foi apresentada uma visão geral de algumas abordagens para o problema de balanceamento de linha. Tratam-se de métodos ótimos como por exemplo, *branch e bound* ou métodos aproximados que geram soluções através da utilização de técnicas randômicas como por exemplo, algoritmos genéticos.

Utilizou-se um problema clássico descrito em Askin (1993) como forma de promover um melhor entendimento do problema. Descreveu-se a metodologia de implementação do AG na resolução de problemas e foram citados alguns estudos que utilizaram AG para tratamento do problema de formação celular (semelhante a formação de grupos de produtos).

Capítulo 3

Material e Método

Como descrito no capítulo anterior, as linhas de montagem têm por objetivo principal atingir altos níveis de produção, seja em relação a um único produto ou a uma família de produtos.

Dentro deste contexto e do ambiente industrial envolvido nesse estudo, estão sendo abordadas neste trabalho duas atividades do processo de produção, que serão tratadas de forma a contribuir para o aumento da produtividade de linhas de montagem SMT :

- a formação de grupos de placas de circuito impresso;
- o balanceamento da linha.

Este capítulo objetiva apresentar a abordagem técnica utilizada no tratamento dos problemas de formação de grupos de placas e balanceamento de uma linha de montagem SMT – ambiente descrito no capítulo 2. É importante mencionar que o foco principal desse estudo está na formação do menor número de grupo de placas.

3.1 Metodologia da solução

Quanto aos parâmetros e variáveis do ambiente de produção considerado nesse trabalho considera-se uma linha de produção com m máquinas, sendo uma máquina de precisão, $m-1$ máquinas de velocidade, e diversos tipos distintos de placas e componentes. No capítulo 2 o leitor pôde conhecer em detalhes o processo de composição de componentes em linhas de montagem

SMT. Nesse momento serão descritas algumas variáveis do ambiente de produção utilizadas como parâmetros de entrada para formação de grupos e balanceamento de linha:

1. o tamanho do lote de placas.
2. os tipos de máquinas existentes na linha.
3. a configuração de cada placa (componentes necessários).
4. o número total de componentes distintos.
5. o tipo de cada componente (se precisão ou velocidade).
6. o espaço que cada componente ocupa na mesa alimentadora.
7. a capacidade de cada tipo de máquina.

O tamanho do lote de placas definirá o número de placas distintas para geração dos indivíduos da população (número de placas em cada seqüência).

Os tipos de máquinas serão utilizados para seguir as restrições do ambiente que determinam que componentes de precisão devem ser alocados somente em máquinas de precisão.

A configuração de cada placa será utilizada como ferramenta principal na busca pela similaridade das placas e possível união em grupo.

O número total de componentes distintos faz parte da caracterização do ambiente de produção e da configuração de cada lote de placas.

O espaço que cada componente ocupa na mesa será utilizado como referência na montagem dos grupos. Duas placas somente estarão no mesmo grupo, caso não exceda a capacidade das máquinas existente na linha, isto é, caso o número total de componentes utilizado por ambas possam ser alocados nas máquinas sem que exceda a capacidade da linha.

Além das variáveis do ambiente de produção alguns parâmetros do AG devem ser definidos para garantir sua estrutura de funcionamento como: número de gerações, número de indivíduos da população, taxas dos operadores probabilísticos, etc. Estes itens serão detalhados individualmente nas próximas subseções.

3.1.1 Representação da solução

A representação da solução é feita através de uma seqüência de símbolos. Relembrando alguns aspectos da formação de grupos de PCI, partindo de um lote específico de placas, distribuídas em seqüência, procura-se agrupá-las de forma a não exceder a capacidade da linha. A

representação cromossômica utilizada nesse estudo foi a própria identificação da placa no lote, ou seja, representada por um número inteiro - a placa 1 seria representada pelo número 1, a placa 2 pelo número 2 e assim por diante.

A figura abaixo, ilustra um exemplo de população com 5 possíveis soluções candidatas à formação de grupos de PCI. Cada seqüência de placas é uma possível solução para o problema porque pode formar ao final, o menor número de grupos.

1	6	3	5	4	7	2
7	3	5	2	4	1	6
4	2	6	1	7	3	5
2	5	1	7	3	6	4
2	5	3	7	1	4	6

Figura 6.1: Exemplo de uma população de 5 soluções candidatas

O tamanho de cada seqüência depende diretamente do número de placas existente no lote. No exemplo acima, a seqüência varia de 1 a 7 demonstrando que o lote possui 7 placas distintas.

3.1.2 População inicial

Escolhida a representação cromossômica, o segundo passo, seria a geração da população inicial a qual demanda a utilização de outros algoritmos de formação de grupos ou a geração randômica dos indivíduos. Nesse caso, seqüências aleatórias distintas foram geradas usando o processo randômico.

Como mencionado anteriormente, cada seqüência representa uma solução candidata e um indivíduo da população. O tamanho da população deve ser definido através de experimentos de acordo com o problema em questão. Nesse estudo adotou-se 80 indivíduos na população inicial.

3.1.3 Estratégia de seleção de indivíduos

O próximo passo é definir a estratégia de seleção de novos indivíduos que irão compor as populações seguintes. Como vimos anteriormente anterior, duas são as estratégias de seleção mais utilizadas – por torneio ou pelo método da roleta. Esse trabalho adotou o método de seleção por torneio como opção.

3.1.4 Operadores genéticos

Para geração de novas populações foram realizados testes com os *crossovers* OX, PMX e *Cycle*. O *crossover* PMX destacou-se por gerar melhores resultados, ou seja, um menor número de grupos de placas foi obtido com a utilização do *crossover* PMX. Os *crossovers* *Cycle* e OX geraram o mesmo número de grupos.

Além do *crossover* PMX também foram utilizados os métodos probabilísticos de seleção (ou eletismo) e mutação. Toda vez que a mutação é executada, processa-se também o eletismo de forma a garantir que não seja perdido material genético de boa qualidade.

O parâmetro que determina a execução tanto da mutação quanto do *crossover* foi fixado em 0.7 para *crossover* e 0.03 para mutação. Todos esses parâmetros: número de gerações, número de indivíduos da população e taxas de mutação e *crossover*, foram determinados através de testes.

3.1.5 Critério de terminação

Para determinar a condição de término ou critério de parada do AG, como descrito no capítulo 2, diversos experimentos foram realizados e um número máximo de gerações foi definido; neste caso, fixado em 50. Esses experimentos consistem em oscilar o número de gerações no processo.

3.1.6 Função objetivo/decodificação da solução

A função objetivo, que medirá a adequabilidade de cada indivíduo no ambiente de busca, foi definida como sendo o número de grupos formados. Como mencionado anteriormente, cada seqüência de placas, após processada pela heurística, formará um determinado número de grupos. O número de grupos formados será utilizado como a função de *fitness* que avaliará a continuidade ou não do indivíduo no processo.

O processo de decodificação pode ser assim definido como mostra a figura 6.2.

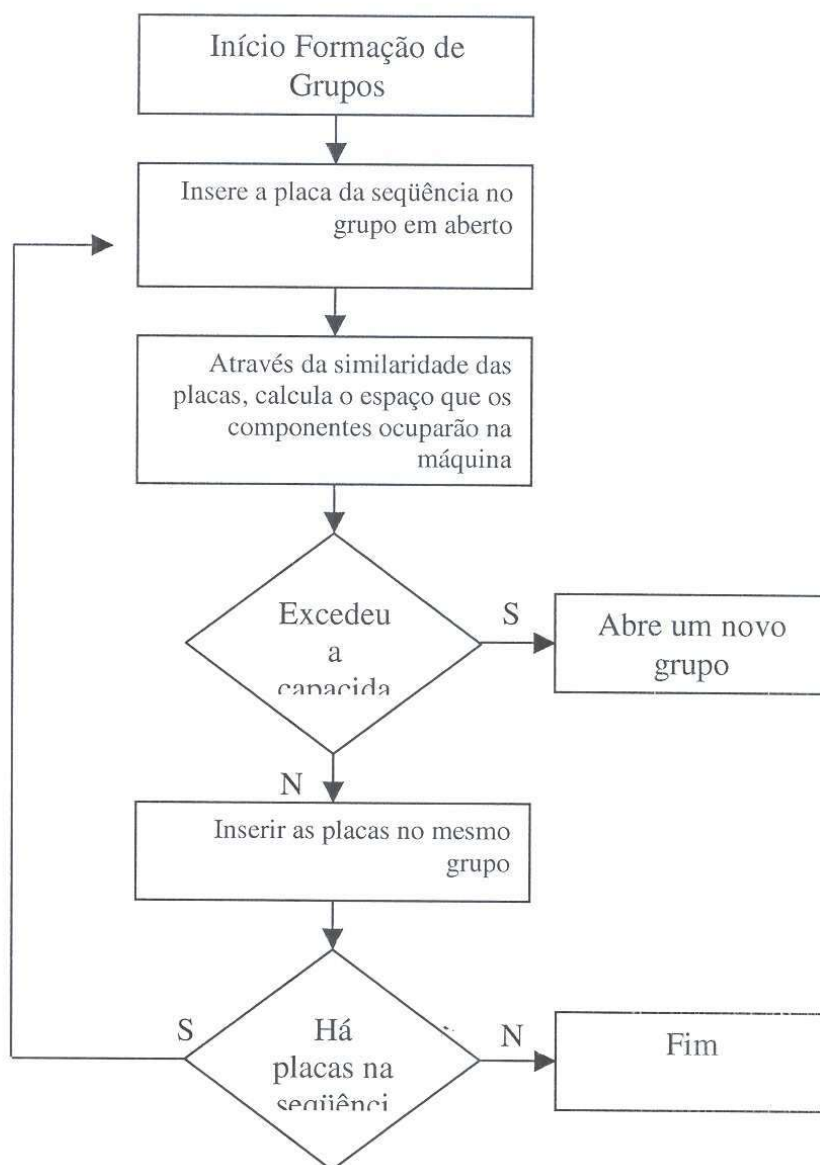


Figura 6.2 Algoritmo para decodificação da solução

O procedimento de formação de grupos adotado controla a capacidade total da linha, de cada máquina individualmente para unir as placas e obter o menor número de grupos, ou seja, somente ocorrerá a união entre placas, quando o somatório dos espaços ocupados pelos componentes utilizados por elas, for inferior a capacidade das máquinas existentes na linha.

Na figura 6.2 está uma visão macro da metodologia de solução empregada na formação de grupos de placas. Todo o algoritmo de formação de grupos foi desenvolvido no ambiente Matlab.

O leitor poderá visualizar melhor a metodologia em um exemplo descrito na seqüência, destacando cada fase do processo.

Um exemplo será descrito a seguir para melhorar o entendimento da metodologia de solução empregada, e os principais pontos do processo de formação de grupos serão destacados.

Considere o seguinte exemplo: um lote com total de placas distintas igual a 5, uma linha com uma máquina de velocidade e uma máquina de precisão, cada uma com capacidade de 9 alimentadores de 8mm ($capv = 9$ e $capp = 9$).

O conjunto de componentes utilizados pelas placas (configuração de cada placa) é representado pela matriz da tabela 6.1. O tipo de cada componente e o número de alimentadores que cada um ocupa na mesa alimentadora são apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.1: Matriz de placas *versus* componentes

Componente	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
Placa 1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1
Placa 2	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
Placa 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Placa 4	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1
Placa 5	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1

Tabela 6.2: Tipo e Espaço dos componentes

Componente	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
Tipo	V	V	V	P	V	V	V	V	V	V	V	P	V	V	V	V	V	V	V	V
Espaço	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1

Na tabela 6.1, o valor 1 significa que a placa utiliza o componente e o valor 0, significa o contrário. Na tabela 6.2, a simbologia “V” significa componentes de velocidade e “P” componentes de precisão. Supondo uma população inicial gerada aleatoriamente como demonstra a Figura 6.3.

4	1	3	2	5
1	3	5	2	4
4	2	3	1	5
4	5	1	2	3
2	5	3	4	1

Figura 6.3: População inicial

O processo de formação de grupos inicia com a primeira seqüência de placas [4 1 3 2 5] da população inicial, como demonstra a figura 6.3.

O primeiro grupo recebe a primeira placa da seqüência, a placa 4. Os componentes da placa 4 são separados por tipo (precisão ou velocidade), priorizando sempre os componentes de precisão para seguir a premissa de que componentes de precisão devem ser alocados somente em máquinas de precisão. Se houver sobra de capacidade de precisão, após os componentes serem alocados, esta sobra será somada a capacidade da(s) máquina(s) de velocidade, pois os componentes de velocidade podem ser alocados em ambos os tipos de máquina.

Analisando os dados da placa 4, verificamos o seguinte cenário: possui apenas um componente de precisão (componente D, pois o componente M não é utilizado pela placa), sendo que este ocupa o espaço de um alimentador na máquina como pode ser observado na Tabela 6.2. Logo, para a máquina de precisão são registrados 1 espaço ocupado e 8 espaços livres. O mesmo é feito para os componentes de velocidade e para máquina de velocidade são registrados 14 espaços ocupados dos 9 espaços livres.

A questão principal está em alocar primeiramente os componentes de precisão e em seguida os de velocidade. Neste caso, a máquina de velocidade possuía apenas 9 espaços livres, mas após a alocação dos componentes de precisão e como os componentes de velocidade podem ser alocados também na máquina de precisão, a máquina de velocidade passou a ter uma capacidade total de 17 espaços, 9 espaços iniciais mais 8 espaços restantes da máquina de precisão. Por este motivo, foi possível alocar os 12 componentes de velocidade que ao todo ocupam 14 espaços nas máquinas.

Por enquanto ainda há apenas uma placa no grupo - placa 4. Segue-se então tentando unir a placa 4 com a próxima placa da seqüência - placa 1.

A placa 1 utiliza um componente de precisão, ocupando o espaço de 1 alimentador. Por comparação, este componente também é utilizado pela placa 4, logo conta-se apenas 1

alimentador. A máquina de precisão fica agora com 1 espaço ocupado, o que não excede sua capacidade inicial de 9 alimentadores.

Para alocar os componentes de velocidade, a máquina possui seu valor inicial de 9 alimentadores mais 8 cedidos pela máquina de precisão, ao todo 17.

A comparação continua para os componentes de velocidade de ambas as placas, pois quando para componentes em comum, apenas o valor de um deles é somado. Neste caso, as placas 4 e 1 possuem os seguintes componentes em comum: *C, D, E, F, G, H, J, O, Q, S e U*. Verifica-se o espaço que estes componentes ocupam e soma-se ainda os espaços que os componentes incomuns ocupam, o que resulta num total de 17 espaços.

O valor de 17 espaços necessários não excede a capacidade, mas se iguala ao valor disponível para alocação dos componentes de velocidade. Desta forma as placas 4 e 1 ficam no mesmo grupo.

O processo continua da mesma forma até que a capacidade de uma ou ambas as máquinas seja excedida. Nesse caso, um novo grupo de placas será aberto e os valores de capacidades voltam ao seu estado inicial.

Após conclusão da heurística para toda primeira seqüência de placas deste exemplo, um total de três grupos são obtidos: o *grupo um* composto pelas placas 4 e 1, o *grupo dois* composto pela placa 3 e o *grupo três* composto pelas placas 2 e 5.

3.1.7 Síntese da metodologia de formação de grupos

Definido os parâmetros do problema e partindo da população inicial, cada indivíduo passará pelo processo completo de formação de grupos.

A figura 6.4 mostra uma síntese de toda metodologia adotada.

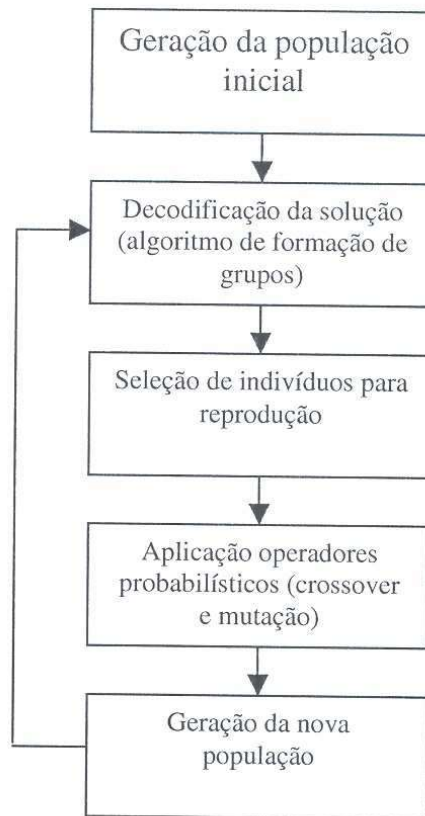


Figura 6.4 Síntese da metodologia

Toda população de indivíduos possua um valor de *fitness* que neste caso é o número de grupos formados. No exemplo acima, o primeiro indivíduo da população terá um valor de *fitness* igual a três grupos formados e assim por diante.

Após toda população de indivíduos passar pelo procedimento de formação de grupos e obter um valor de *fitness*, o processo de torneio, escolhido para seleção de indivíduos, será executado de forma a selecionar pares de indivíduos que na sequência sofrerão ou não *crossover*.

Após seleção dos indivíduos, o processo de *crossover* será executado. Um número aleatório será gerado e caso este seja menor ou igual a taxa de *crossover*, esse será executado em nível de pares de indivíduos. O *crossover* escolhido para esse estudo foi o *crossover* PMX como mencionado anteriormente.

Após o processamento do *crossover*, a mutação será executada na sequência e como no processo de *crossover*, um número aleatório será gerado para cada indivíduo da população e caso este seja menor ou igual a taxa de mutação (parâmetro de entrada), a mutação será executada.

Caso a mutação seja executada, o elitismo também será processado de forma a manter bom material genético para as próximas gerações de indivíduos. O elitismo selecionará o indivíduo que possui melhor *fitness* para que continue na próxima geração.

O procedimento continua desta forma por 50 gerações. Cada geração passando pela formação de grupos e pela transformação dos operadores probabilísticos. Em cada geração é armazenada a seqüência que gerou a menor formação de grupos e o resultado final será a seqüência que gerou o menor número de grupos de todas as gerações.

3.2 Balanceamento de Linha

O objetivo do balanceamento de linha é, para cada grupo formado, distribuir a carga de trabalho nas máquinas da linha de forma a garantir uma maior uniformidade do trabalho das máquinas, possibilitando que a linha obtenha, com isso, o máximo de produtividade. O processo de balanceamento de linha pode ser subdividido em três grandes etapas principais:

1. alocar componentes de precisão.
2. aproximar os tempos de montagem das máquinas alocando componentes comuns
3. balancear a carga de trabalho com a alocação dos componentes restantes.

Exceto na etapa 1, em cada uma das outras etapas, um artifício que garantisse a redução do tempo ocioso das máquinas na linha foi utilizado. É importante lembrar que o parâmetro de entrada para o processo de balanceamento são os grupos gerados pela formação de grupos. Sendo assim, cada grupo a ser produzido passa pela heurística de balanceamento.

Para o processo de balanceamento de linha, são mantidas algumas variáveis de produção já utilizadas no processo de formação de grupos. São elas: número de componentes, capacidade total da linha e de cada máquina individualmente, grupo de placas formado, configuração das placas em nível de componentes, tipo de cada componente e espaço que cada um ocupa na máquina. Uma nova variável que se destaca neste momento é **a matriz de quantidades** que define, para cada tipo de placa, os tempos de montagem individuais de cada tipo de componente requerido pela placa.

3.2.1 Alocar componentes de precisão

A primeira etapa consiste em alocar todos os componentes de precisão na máquina de precisão visto que esses componentes não podem ser alocados na máquina de velocidade. É importante lembrar que o cenário em estudo prevê, na linha, a utilização de uma única máquina de precisão.

O tempo de montagem associado à máquina e à sua capacidade são pontos chaves no processo, definidos através da matriz de quantidades (quantidade da placa no lote multiplicado pelo tempo de montagem do componente).

O processo de balanceamento de linha nesta etapa ocorre da seguinte forma:

1. são identificados/quantificados os componentes de precisão utilizados por todas as placas do grupo.
2. para cada componente de precisão utilizado pelo grupo é verificado o tempo total de montagem.
3. de acordo com o espaço que cada componente de precisão ocupa na máquina, é definido a capacidade total utilizada.

Ao final desta etapa, todos os componentes de precisão estarão alocados na máquina de precisão e algumas informações importantes para continuidade do processo serão geradas: tempo de montagem e capacidade já alocados à máquina de precisão, capacidade ainda disponível e o número de componentes alocados na máquina.

3.2.2 Aproximar os tempos de montagem alocando componentes comuns

A segunda etapa prevê o nivelamento da carga de trabalho entre as máquinas da linha e consiste em alocar componentes de velocidade na(s) máquina(s) de velocidade que se encontra(m) “vazia(s)” até o momento. A alocação dos componentes deve ocorrer até que o tempo de montagem na(s) máquina(s) de velocidade seja menor ou igual ao tempo de montagem da máquina de precisão, ou seja, alocar componentes na(s) máquina(s) de velocidade até que esta(s) possua(m) uma carga de trabalho próxima à carga de trabalho já alocada na máquina de precisão.

Neste ponto, é calculado um índice de utilização do componente que significa quanto cada componente é utilizado pelo grupo de placas como um todo. Quanto maior o índice, maior a utilização do componente pelo grupo. Este artifício foi utilizado neste momento para considerar o

problema de **centralização de componentes** – quando muitos componentes de uma única placa do grupo fica centralizado em uma única máquina da linha.

O problema de centralização de componentes se torna extremamente prejudicial quando a quantidade de cada placa do grupo no lote possui um acentuado diferencial. Para entendimento desse problema, suponha que existem duas placas no grupo – placa 1 e placa 2 e que a quantidade de cada placa no lote seria respectivamente 100 e 200. Ao concentrarmos os componentes da placa 2 somente em uma das máquinas da linha, pode ocorrer que as outras máquinas concluam a composição dos componentes certo tempo antes da máquina que possui os componentes da placa 2, tornando a linha totalmente desbalanceada com tempos ociosos de máquina. Por este motivo, é que procura-se neste momento alocar os componentes comuns para todas as placas do grupo. Desta forma, as placas passarão por todas as máquinas da linha.

Sabe-se que este é o momento mais crítico do balanceamento, onde os componentes de velocidade se concentram na(s) máquina(s) de velocidade da linha até que o tempo de montagem se aproxime ao tempo de montagem da máquina de precisão. Com a alocação dos componentes de precisão somente na máquina de precisão, a centralização de componentes já pode ter ocorrido e depende exclusivamente dos tipos de placas existentes no lote.

Outro fator importante é a capacidade da máquina, não somente nesta etapa, mas no processo de balanceamento como um todo. É necessário considerar, na medida em que se alocam os componentes, não somente o tempo de montagem, mas também a capacidade da máquina. Observa-se que muitas vezes, o nivelamento da carga de trabalho não é possível de forma integral devido a capacidade das máquinas. No momento da alocação dos componentes e sendo que estes podem ocupar espaços variáveis nas máquinas, algumas delas podem exceder sua capacidade logo de início necessitando reavaliar todo o processo.

Sendo assim, quando na alocação dos componentes de velocidade essas duas variáveis trabalham juntas e não devem ser consideradas isoladamente.

3.2.3 Balancear a carga de trabalho

A última etapa do processo de balanceamento seria distribuir da maneira mais uniforme possível os componentes de velocidade restantes. Esta etapa foi denominada de “balancear a carga de trabalho” justamente porque os componentes que restam para serem alocados é que

farão efetivamente o trabalho de balanceamento, ou seja, nas duas primeiras etapas a centralização de componentes pode ter ocorrido. Mesmo assim, alguns problemas também podem ser reconhecidos neste ponto do processo, ou seja, as máquinas da linha de montagem podem se encontrar nas seguintes situações:

1. totalmente balanceadas quanto ao tempo de montagem, mas com problemas de capacidade.
2. totalmente balanceadas quanto a capacidade das máquinas, mas com desvios no tempo de montagem.
3. totalmente balanceadas quanto a capacidade da máquina e tempos de montagem.

No item 1 “com problemas de capacidade” significa que após alocados os componentes de precisão e de velocidade até que os tempos de montagem sejam semelhantes, pode ocorrer de algumas máquinas estarem com sua capacidade quase esgotada e neste momento, um possível balanceamento com os componentes restantes, apesar de viável, seria extremamente difícil, pois quando a capacidade de uma máquina for excedida, os componentes serão alocados somente nas outras máquinas com capacidade disponível, provocando novamente o problema de centralização de componentes.

No item 2 “com desvios no tempo de montagem” significa que é possível termos um balanceamento da capacidade das máquinas da linha, mas os tempos de montagem podem apresentar um diferencial considerável mesmo quando o objetivo é nivelar os tempos de montagem.

Os itens 1 e 2 ocorrem porque, diferente da prática, o procedimento de balanceamento trabalha com possibilidades, ou seja, para balancear os tempos de montagem das máquinas, pergunta-se:

início

Se (tempo_maquina_precisao < tempo_maquina_velocidade) **e**

(cap_precisao < capacidade_total_maquina_precisao) **então**

Alocar os componentes na máquina de precisão

senão

Alocar os componentes na máquina de velocidade

fim

Ou seja, o tempo da máquina de precisão é menor que o tempo da máquina de velocidade? Além disto, a máquina de precisão possui capacidade disponível? Somente quando as duas respostas forem positivas é que os componentes serão alocados na máquina de precisão, caso contrário serão alocados na(s) máquina(s) de velocidade. O que se deseja mostrar aqui é que mesmo que o tempo de montagem da máquina de precisão seja menor que o tempo da máquina de velocidade, devido a problemas de capacidade esgotada, o próximo componente será alocado na máquina de velocidade. Este procedimento será seguido até que todos os componentes de velocidade restantes da segunda etapa, sejam alocados.

Para amenizar os problemas descritos nos itens 1 e 2 dessa seção, seria importante considerar em trabalhos futuros um possível percentual de “desbalanceamento”, acrescentando acima, a seguinte pergunta: o percentual de desbalanceamento, com a alocação do próximo componente, seria inferior a X ? Com este fator os problemas poderiam também ser minimizados.

Ao final das três etapas, conhecendo-se os componentes alocados em cada tipo de máquina, um nível de “desbalanceamento” pode ser calculado. Este desbalanceamento considera que as placas do grupo são montadas individualmente e sendo assim, para cada placa, verifica-se a distribuição dos seus componentes em ambas as máquinas e o tempo de montagem que cada placa permanecerá na máquina. Além disto, esta informação é importante para apontar a centralização de componentes (quando muitos componentes de uma placa são alocados em apenas uma máquina da linha).

3.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as abordagens técnicas utilizadas para o problema de formação de grupos de placas e balanceamento de linhas de montagem SMT.

Sem exceder a capacidade das máquinas e com base na similaridade das placas em nível de componente, o processo de formação de grupos que utiliza algoritmo genético como abordagem técnica, prevê a formação do menor número de grupos de placas possível, procurando reduzir ao máximo o número de *setups* necessários para a produção de um determinado lote de placas. Nesse trabalho ocorreu maior ênfase ao processo de formação de grupos de placas.

A metodologia para o processo de balanceamento de linha também foi apresentado neste capítulo. Com o emprego dessa metodologia, espera-se um possível balanceamento da carga de trabalho nas máquinas da linha.

Capítulo 4

Resultados

Através da formação de grupos de placas e do balanceamento de linha, esse estudo objetivou elevar os índices de produtividade em linhas de montagem SMT.

Em se tratando de formação de grupos, um estudo anterior foi apresentado por Brochonski e Candido (1999). Devido ao fato de que esse trabalho trata cenários realísticos de uma indústria eletrônica, utilizou-se os mesmos cenários de produção de Brochonski e Candido (1999) como forma de comparação das técnicas e resultados obtidos em ambos os trabalhos. Em um segundo momento, os cenários são ampliados para que a mesma técnica sugerida por esse estudo abranja uma maior variedade de ambientes de produção.

Nesse estudo, após a formação de grupos, é feito o balanceamento da linha através da distribuição uniforme da carga de trabalho nas máquinas da linha de montagem. Distribuir a carga de trabalho, como já foi mencionado anteriormente, significa alocar os componentes necessários para montagem de um grupo de placas às máquinas de trabalho existentes na linha de montagem.

Este capítulo está organizado em duas grandes seções: formação de grupos e balanceamento da linha. Na seção de formação de grupos, em um primeiro momento, são apresentados os resultados da comparação desse estudo com o estudo de Brochonski e Candido (1999); e em um segundo momento, os cenários de produção são alterados de forma que caracterizem o ambiente de produção em estudo. Em seguida são apresentados os resultados obtidos com o balanceamento de linha.

4.1 Formação de Grupos

O estudo de Brochonski e Candido (1999) possui duas fases: a formação de grupos de placas (primeira fase) e a programação finita da produção (segunda fase). Levando em consideração que a primeira fase desse estudo também se preocupa com a formação de grupos de placas e ainda mais, servindo como ferramenta de apoio e comparação de resultados e técnicas, foram utilizados, num primeiro momento, os mesmos cenários de produção de Brochonski e Candido (1999).

O foco principal está em analisar o desempenho do AG tanto em nível de tempo computacional como, principalmente, quanto a técnica de formação de grupos utilizada em ambos os trabalhos, ou seja, comparar a mesma formação de grupos utilizando AG com a utilização do Coeficiente de Jaccard somado a uma rotina de formação de grupos, elaborada por Brochonski e Candido (1999).

Embora ambos os trabalhos tratem da formação de grupos de placas em ambientes SMT, algumas diferenças podem ser apontadas que caracterizam a diversidade dos cenários de produção encontrados neste tipo de ambiente, ao mesmo tempo que abrem inúmeras possibilidades de pesquisa nesse setor.

O cenário trabalhado por Brochonski e Candido(1999) prevê a utilização de uma máquina na linha. Os componentes podem ocupar cada um, somente um slot de 8mm na mesa alimentadora, ou seja, um alimentador de 8 mm. Componentes de precisão também não são considerados.

A grande diferença entre ambos os estudos está em que nesse é considerado uma linha de montagem com m máquinas, sendo uma máquina de precisão e diversos tipos de componentes (tanto de velocidade quanto de precisão). Esses podem ocupar mais de um espaço de 8 mm na mesa alimentadora.

A heurística de formação de grupos utilizando AG foi desenvolvida nesse estudo de forma a possibilitar a parametrização de algumas variáveis, por exemplo: número de máquinas na linha, tipos de componentes, espaço que os componentes podem ocupar na máquina, número de placas e capacidade da(s) máquina(s) na linha. Isso possibilitou que a comparação de resultados fosse efetivada. Em primeiro lugar parametrizou-se as variáveis conforme o cenário de produção utilizado por Brochonski e Candido (1999) e em seguida, após apontamento dos resultados, as

variáveis foram novamente parametrizadas para considerar cenários mais complexos do mesmo ambiente de produção.

4.1.1 Parâmetros

As entradas do algoritmo de formação de grupos, como já descritos no capítulo anterior, são parametrizáveis e podem se dividir em dois tipos de variáveis: as variáveis de controle do AG (como taxa de *crossover*, por exemplo) e as variáveis que definem o cenário de produção (como capacidade das máquinas). Os valores das variáveis que definem o cenário de produção, em um primeiro momento com o objetivo de comparação dos resultados, são aqueles utilizados no estudo de Brochonski e Candido (1999) como mostra a tabela 7.1. Dessa forma, objetivou-se a validação da metodologia empregada nesse estudo.

Tabela 7.1: Cenários de Produção

Seleção	Problema	Nº Placas	Capacidade Alimentadores	Nº Componentes médio / placa	Diversidade (componentes distintos na seleção)
I	a	5	50	42	80
	b	10			
	c	15			
	d	20			
	e	30			
	f	50			
II	g	5	18	15	20
	h	10			
	i	15			
	j	20			
	l	30			
	m	50			
III	n	5	80	67	141
	o	10			
	p	15			
	q	20			
	r	30			
	s	50			
IV	t	5	50	42	200
	u	10			
	v	15			
	w	20			
	x	30			
	y	50			

Em cada cenário, o número de alimentadores livres na máquina (capacidade da máquina) em relação à média de componentes por placa é de aproximadamente 20%.

O que caracteriza a complexidade do problema em termos de tempo computacional são as seguintes variáveis: número de placas, número médio de componentes por placa e número de componentes distintos no problema (diversidade).

Em se tratando das variáveis de controle do AG, cada estudo em particular define valores considerados “bons”, ou seja, encontra-se na literatura valores que geram bons resultados, mas dependem totalmente do estudo em questão, pois não há regras para fixar os valores. Sendo assim, para definição dos valores considerados “bons” para o cenário trabalhado nesse estudo, alguns experimentos foram adotados. Estes experimentos prevêem a execução de uma bateria de testes para encontrar valores para os seguintes parâmetros:

- número de indivíduos da população;
- número de gerações;
- taxa de mutação;
- taxa de *crossover*.

Quanto ao tamanho da população, foram executados testes com 100, 80 e 50 indivíduos. O cenário escolhido para esses testes foi o cenário **p**, descrito na tabela 7.1, e conforme breve análise, pôde ser considerado como um cenário de complexidade média dentre os demais.

Escolheu-se o valor de 80 indivíduos como tamanho da população. Com 80 indivíduos, o número de grupos formados manteve-se, mas a medida que este número diminui, a solução aumenta, ou seja, soluções piores são encontradas. Isto explica o fato de que quanto maior o número de indivíduos ou soluções viáveis, maiores as chances de que um bom resultado seja encontrado.

Para encontrar o melhor valor para o parâmetro número de gerações, foram executados testes com 100, 80, 50 e 20 gerações. Nesses testes procurou-se utilizar os cenários mais complexos, como os cenários **s** e **x**, por exemplo. Executando testes com tamanho de geração de 100, 80 e 50 gerações, os testes geraram a mesma solução mantendo o mesmo resultado. Com 20 gerações, soluções piores foram encontradas. Devido a esses testes terem sido executados com os cenários mais complexos e sabendo que com 50 gerações se manteve boas soluções para o número de grupos formados, o número de gerações foi fixado em 50.

As taxas de mutação e *crossover* inicialmente foram “setadas” em 0.03 e 0.7 respectivamente, conforme alguns casos de sucesso encontrados na literatura. Com a alteração da

taxa de mutação de 0.03 para 0.09, os resultados melhoraram significativamente, ou seja, obteve-se um menor número de grupos formados. A alteração da taxa de *crossover* não gerou bons resultados, por este motivo, manteve-se a taxa em 0.07. Esta combinação de valores, como já mencionado anteriormente, depende diretamente de experimentos realizados com cada problema em particular. Estas taxas (0.09 e 0.07) foram utilizadas em ambos os cenários de produção, ou seja, com os cenários apresentados por Brochonski e Candido (1999) e para os cenários de produção que fazem parte desse estudo (para comparação dos resultados).

4.1.2 Comparação dos Resultados

Utilizando os mesmos cenários de Brochonski e Candido (1999), a tabela 7.2 apresenta os resultados alcançados ao mesmo tempo em que se faz uma comparação entre eles.

Tabela 7.2: Comparativo

Problema	Grupos HBC	Tempo HBC	Grupos HAG	Tempo HAG
a	3	00:03	3	00:03
b	6	00:08	6	00:09
c	9	00:15	9	00:14
d	11	00:26	11	00:19
e	17	01:02	16	00:19
f	31	03:21	32	00:32
g	4	00:02	3	00:03
h	6	00:05	4	00:04
i	5	00:10	5	00:04
j	9	00:17	6	00:25
l	7	00:44	8	00:25
m	11	02:41	11	00:30
n	3	00:04	3	00:08
o	5	00:11	5	00:16
p	9	00:21	9	00:16
q	11	00:36	11	00:20
r	14	01:25	15	00:28
s	24	04:24	25	00:29
t	5	00:05	5	00:05
u	7	00:14	7	00:07
v	12	00:34	11	00:19
w	17	00:56	16	00:21
x	16	01:45	18	00:30
y	17	05:28	17	00:45

Grupos HBC: número de grupos formados em Brochonski e Candido (1999).

Tempo HBC: tempo computacional para formação de grupos em Brochonski e Candido (1999).

Grupos HAG: número de grupos formados utilizando AG.

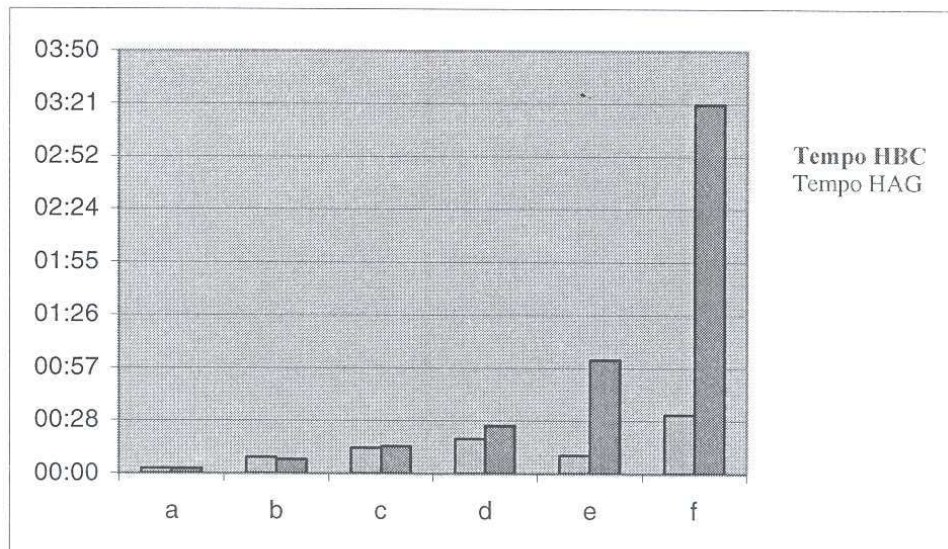
Tempo HAG: tempo computacional para formação de grupos utilizando AG.

Na tabela acima observa-se uma melhora nos resultados onde o número de placas, o número de componentes médio por placa e a diversidade de componentes é baixo, ou seja, em cenários pequenos o AG alcança melhores resultados que a técnica apresentada por Brochonski e Candido (1999).

Isto propõe pesquisas futuras no sentido de aprimorar o AG com técnicas adicionais ou substitutas como: o método da roleta para seleção de indivíduos e escalonamento da função objetivo, dentre outros. Estas novas técnicas podem contribuir para o alcance de melhores resultados para os problemas mais complexos.

Quanto ao tempo computacional gasto em ambas as técnicas, o gráfico 1 apresenta uma amostra comparativa em relação ao cenário I.

Gráfico 7.1: Comparativo – Tempo Computacional



Quanto maior a complexidade do problema, maior o tempo computacional despendido na proposta de Brochonski e Candido (1999). Com o cenário f, por exemplo, o AG obteve um ganho de 87% em relação ao trabalho de Brochonski e Candido (1999). Para execução dos testes foi

utilizado um microcomputador com processador Pentium III de 800 Mhz. Para os demais problemas, II, III e IV os mesmos ganhos foram alcançados.

4.1.3 Novos Cenários

Após comparação dos resultados, o AG foi parametrizado de forma a caracterizar o cenário de produção em estudo. Somente as variáveis do cenário de produção foram alteradas; as variáveis de controle do AG permaneceram com número de gerações igual a 50, número de indivíduos igual a 100 e taxa de mutação e *crossover*, 0.9 e 0.7 respectivamente.

Os cenários utilizados por Brochonski e Candido (1999), foram alterados nesse estudo de forma a caracterizar o ambiente de produção em questão. A principal alteração está no número de máquinas da linha de montagem que passa de uma máquina para duas, sendo uma de precisão e uma de velocidade. A tabela 7.3, mostra os novos cenários:

Tabela 7.3: Novos cenários de produção

Seleção	Problema	N° Placas	Capacidade Máquina Velocidade (n° compon.)	Capacidade Máquina Precisão (n° compon.)	Média componentes/placa	Componentes		Diversidade (componentes distintos na seleção)
						Veloc.	Prec.	
I	a	5	50	50	75	90	30	120
	b	10						
	c	15						
	d	20						
	e	30						
	f	50						
II	g	5	20	20	36	39	13	52
	h	10						
	i	15						
	j	20						
	l	30						
	m	50						
III	N	5	80	80	115	120	40	160
	O	10						
	P	15						
	Q	20						
	R	30						
	S	50						

O número de alimentadores livres na máquina (capacidade total das máquinas) em relação a média de componentes distintos por placa nos problemas I, II e III, variam em torno de 10 a 20%.

Para montagem dos cenários foram consideradas algumas características do ambiente de produção:

- 20 a 30% dos componentes de uma placa são de precisão;
- 10 a 20% dos componentes ocupam mais de um slot de 8 mm na mesa alimentadora.

Os resultados obtidos com AG através da ampliação dos cenários de produção, são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 7.4: Formação de Grupos com AG

Seleção	Problema	Nº Grupos	Tempo Comp.
I	a	4	00:04
	b	7	00:08
	c	13	00:15
	d	16	00:19
	e	24	00:20
	f	41	00:51
II	g	4	00:03
	h	8	00:04
	i	12	00:07
	j	14	00:08
	l	25	00:14
	m	42	00:23
III	n	2	00:05
	o	5	00:12
	p	5	00:18
	q	6	00:13
	r	11	00:35
	s	21	1:00

4.2 Balanceamento de Linha

O principal parâmetro de entrada para o processo de balanceamento de linha são os grupos formados pelo processo de formação de grupos de placas. Além deste parâmetro utilizam-se variáveis do ambiente de produção já conhecidas no processo de formação de grupos e que se fazem necessárias também neste momento, são elas: número total de componentes utilizados

pelas placas do grupo, capacidade total da linha, configuração das placas (placas x componentes), espaço que os componentes ocupam nas máquinas e o tipo de cada componente.

O objetivo é testar o balanceamento de linha para grupos que possuam grande, médio e pequeno número de placas. O desempenho da heurística em termos de tempo computacional não foi considerado como fator relevante nesse processo, pois independente da complexidade do problema, o tempo computacional se mostrou irrisório, sendo que para os cenários mais complexos não se ultrapassou o tempo de cinco segundos para execução do processo.

Quanto a complexidade do problema, dois fatores se mostraram relevantes: o número de placas existentes em cada grupo e o número total de componentes requeridos pelo grupo. A tabela 7.5 apresenta os cenários de produção escolhidos e nesse caso, para geração dos resultados, foi considerada uma linha de montagem com apenas duas máquinas - uma de velocidade e outra de precisão.

Tabela 7.5 Cenários para o balanceamento de linha

Grupos	Nº Placas	Nº Total Componentes	Capacidade Total Linha (nº componentes)
G1	2	70	50
G2	3	80	50
G3	4	20	18
G4	5	50	50
G5	6	20	18

A tabela 7.6 demonstra o resultado geral do processo:

Tabela 7.6: Resultado do processo de balanceamento de linha

Grupo	Máquina Precisão			Máquina Velocidade		
	Componentes Alocados	Capacidade Utilizada (unidade?)	Tempo de Montagem (seg.)	Componentes Alocados	Capacidade Utilizada (unidade?)	Tempo de Montagem (seg.)
G1	22	25	3236	21	25	3245
G2	24	25	5562	25	25	5231
G3	8	9	2616	8	9	2356
G4	20	25	6775	16	19	8208
G5	9	9	3531	8	8	3841

O tempo de montagem significa o total de segundos que as placas permanecerão em cada uma das máquinas. Um melhor entendimento do resultado gerado pode ser observado da seguinte forma: o grupo de placas G1 é formado por duas placas; apenas uma placa utiliza uma diversidade de 43 componentes ao todo. Desses, 22 componentes foram alocados na máquina de precisão ocupando a capacidade total da máquina, que são de 25 slots de 8mm. Os 21 componentes restantes foram alocados na máquina de velocidade e ocuparam da mesma forma, a capacidade total da máquina.

Uma visão grosseira do balanceamento da linha pode ser vista no tempo que cada placa permanece em cada máquina, ou seja, na máquina de precisão a placa permanecerá 3236 segundos e na máquina de velocidade 3245 segundos. De certa forma o tempo de montagem da linha como um todo encontra-se balanceado.

Em uma visão mais detalhada do processo, é importante considerar não somente o tempo que cada placa permanece na máquina, mas também como ficou o problema de centralização dos componentes, ou seja, os componentes de uma única placa ficam mais centralizados em uma única máquina. Para descobrir o nível de centralização de componentes que o processo ocasionou é preciso verificar se, no caso do grupo G1 da tabela 7.6, quantos dos 22 componentes alocados

na máquina de precisão se referem a placa 1 e a placa 2 (G1 possui apenas duas placas) e quantos dos 21 componentes alocados na máquina de velocidade a placa 2 utiliza.

Sendo assim, após processamento dos resultados do balanceamento de linha, para cada cenário da tabela 7.6 foi feito este cálculo e denominou-se como o nível de desbalanceamento entre as placas de um mesmo grupo, resultando nos seguintes valores para cada cenário individualmente:

Tabela 7.7 Nível de “desbalanceamento”

Grupo	Nº Placas no grupo	Placa1 / Componentes		Placa2 / Componentes	
		Maq. Precisão	Maq. Velocidade	Maq. Precisão	Maq. Velocidade
G1	2	21	16	22	20

Na tabela 7.7 observa-se que dos 22 componentes alocados na máquina de precisão, 21 são utilizados pela placa 1 e 22 componentes são utilizados pela placa 2. Dos 21 componentes alocados na máquina de velocidade 16 componentes são utilizados pela placa 1 e 20 componentes são utilizados pela placa 2.

Sendo assim, é importante conhecer o tempo real que cada placa permanecerá em cada máquina. A tabela 7.8 mostra esses tempos para o caso de G1:

Tabela 7.8 Tempos de montagem para cada placa do grupo

Grupo	Nº Placas no grupo	Placa1 / Tempo		Placa2 / Tempo	
		Maq. Precisão	Maq. Velocidade	Maq. Precisão	Maq. Velocidade
G1	2	1815	1704	1421	1541

Para processar a montagem de 21 componentes alocados na máquina de precisão, a placa 1 deverá permanecer por 1815 segundos. Na máquina de velocidade ela permanecerá por 1704 segundos para processar a montagem dos 16 componentes alocados nessa máquina. Analisando o processo dessa forma, o nível de desbalanceamento se mostra mais significativo.

Observando todo o processo de balanceamento de linha, nesse cenário em particular, o problema poderia ser amenizado caso os componentes de precisão não precisassem serem alocados somente na máquina de precisão. Nesse caso, a carga de trabalho a ser nivelada entre as máquinas seria mais fácil de ser distribuída. O leitor pode notar que houveram dois momentos em que ficou evidente o problema de centralização de componentes, na primeira etapa do balanceamento de linha, com a alocação dos componentes de precisão restritos à máquina de precisão, e na segunda etapa, quando foi necessário alocar uma grande quantidade de componentes na máquina de velocidade até que os tempos de montagem ficassem aproximados.

Muitos são os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos para esse cenário de produção como o uso de abordagens aproximadas como o próprio AG (por exemplo) na tentativa de encontrar o melhor arranjo de componentes entre as máquinas da linha de montagem. Isto poderia contribuir para um melhor resultado do processo como um todo.

4.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos através da metodologia empregada tanto para o problema de formação de grupos de placas quanto para o problema de balanceamento de linha. No próximo capítulo, esse trabalho será finalizado com as considerações finais e possíveis trabalhos futuros.

Conclusão

Relembrando, o objetivo desse trabalho está em aumentar os índices de produtividade de uma linha SMT. Para alcançar este objetivo duas atividades do processo de planejamento da produção foram abordadas: a formação de grupos de placas de circuito impresso, e o balanceamento da linha.

Partindo de um lote de produção específico, com a formação do menor número de grupos possível objetivou-se reduzir o número de setups necessários, os quais demandam um tempo significativamente relevante quando analisado todo o processo de composição de placas.

Após a formação dos grupos, e para cada grupo especificamente, procurou-se balancear a carga de trabalho entre as máquinas da linha para garantir a redução do ocioso de máquina e com isto aumentar a produtividade da linha.

Em ambas as atividades abordadas nesse trabalho, resultados consideráveis foram alcançados. A formação de grupos com a utilização do AG reduziu o número de grupos formados para problemas de pequeno porte quando comparado a técnica de Brochonski e Candido (1999). O balanceamento de linha retratou os problemas inerentes do ambiente de produção e a dificuldade do balanceamento entre as máquinas.

Outros trabalhos futuros são importantes. No caso da formação de grupos com o uso de AG aprimoramentos na técnica de seleção de indivíduos poderiam ser despendidos para conseguir alcançar melhores resultados para cenários complexos. Além disto, aprimoramentos no algoritmo de formação de grupos mais precisamente no cálculo de similaridade entre as placas, poderiam otimizar o processo.

No caso do balanceamento de linha, como já foi mencionado anteriormente, um nível de desbalanceamento poderia ser aplicado em trabalhos futuros, com o intuito de nivelar ainda a carga de trabalho nas máquinas da linha.

Referências Bibliográficas

- [AMM97] AMMONS, J.C.; CARLYLE, M.; CRANMER, L.; DePUY, G.; ELLIS, K.; MCGINNIS, L.F.; TOVEY, C.A.; XU, H. *Component allocation to balance workload in printed circuit card assembly systems*. IIE Transactions, 1997, 29, p.265-275.
- [ASK93] ASKIN, RONALD G.; STANDRIDGE, CHARLES R. *Modeling and analysis of manufacturing systems*. John Wiley & Sons Inc. New York, 1993.
- [BIL94] BILLO, R.; TATE, D.; BIDANDA, B. Comparison of a genetic algorithm and cluster analysis for the cell formation problem: A case study. 3rd Industrial Engineering Research Conference, Atlanta, GA, 1994, p.538-548.
- [BRO99] BROCHONSKI, PAULO; CANDIDO, MARCO ANTONIO BARBOSA. *Sistema para programação da produção com capacidade finita em máquinas SMT*. Dissertação de Mestrado: PUCPR, 1999.
- [BUR63] BURBIDGE, J.L. *Production flow analysis*. Production Engineer, 1963, 42, 12, p.742-752.
- [BUR70] BURBIDGE, J.L. *Production flow analysis, in Proceedings of Group Technology International Seminar*. International Center for Advanced Technical and Vocational Training, Turin, 1989.
- [CHA87] CHANDRASEKHARAN, M.P.; RAJAGOPALAN, R. *Zodiac-an algorithm for concurrent formation of part-families and machine-cells*. International Journal of Production Research, 1987, 25, p.835-850.

- [DAS91] DASKIN, M.S. *An overview of recent research on assigning products to groups for group technology production problems*. Northwestern University, Chicago, 1991.
- [GUP95] GUPTA, Y.; GUPTA, M.; KUMAR, A.; SUNDRAM, C. *Minimizing total intercell and intracell moves in cellular manufacturing: A genetic algorithm approach*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1995, 8, p.92-101.
- [JOI96] JOINES, JEFFREY A.; CULBRETH, C. THOMAS; KING, RUSSELL E. *Manufacturing Cell Design: An Integer Programming Model Employing Genetic Algorithms*. IIE Transactions, 1996, 28, 1, p.69-85.
- [KAZ96] KAZEROONI, M.; LUONG, L.; ABHARY, K. *Cell formation using genetic algorithms*. International Journal of Factory Automation and Information Management, 1996, 3, 3&4, p.283-301.
- [KIN82] KING, J.R.; NAKORNCHAI, V. *Machine-component group formation in group technology: review and extension*. International Journal of Production Research, 1982, 20, p.117-133.
- [KUM86] KUMAR, K. RAVI; KUSIAK, ANDREW; VANNELLI, ANTHONY. *Grouping of parts and components in flexible manufacturing systems*. European Journal of Operations Research, 1986, 24, p.387-397.
- [LEN74] LENSTRA, J. K. *Clustering a data array and the traveling-sales problem*. Operations Research, 1974, 22, 413-414.
- [MIT66] MITROFANOV, S.P. *The Scientific Principles of Group Technology*. National Lending Library Translation, UK.

- [SEI86] SEIFODDINI, HAMID; WOLFE PHILIP M. *Application of the Similarity Coefficient Method in Group Technology*. IEEE Transactions, 1986, p.271-277.
- [SUR98] SURESH, NALLAN C.; KAY, JOHN M. *Group Technology and Cellular Manufacturing*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 1998.
- [TAN95] TANOMARU, JULIO *Motivação, Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos*. II Congresso Brasileiro de Redes Neurais, Curitiba, 1995.
- [VEN92] VENEGUPAL, v.; NARENDRAN, T.T. *Cell formation in manufacturing systems through simulated annealing: An experimental evaluation*. European Journal of Operations Research 63, p.409-422.