
Ana Sofia de Almeida Simaria

**Uma Metodologia para o Balanceamento
de Linhas de Montagem**

**Escola de Gestão do Porto
2001**

Ana Sofia de Almeida Simaria

**Uma Metodologia para o Balanceamento
de Linhas de Montagem**

Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Gestão do Porto

2001

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu reconhecimento:

Ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Manuel Moreira da Rocha Vilarinho, pela dedicação e empenho que colocou no acompanhamento desta dissertação bem como pela forte motivação dada ao longo da sua realização.

Ao Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro, na pessoa do presidente do conselho directivo Professor Doutor Henrique Diz, pela disponibilização das condições necessárias à realização deste trabalho.

À Escola de Gestão do Porto, antigo ISEE, pela possibilidade de frequentar o curso de mestrado em Métodos Quantitativos em Gestão.

Aos meus colegas do DEGEI pelo apoio e amizade.

Ao João, aos meus Pais e ao meu Irmão, a quem dedico este trabalho, pelo infinito amor, apoio e incentivo.

Índice

1	Introdução geral.....	1
1.1	Relevância do problema	2
1.2	Objectivo da dissertação	3
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Enquadramento do problema de balanceamento de linhas de montagem ...	5
2.1	Introdução	3
2.2	Tipos de sistemas de produção discreta	6
2.3	Conceitos básicos relativos a linhas de montagem	10
2.4	Definição do problema de balanceamento de linhas de montagem	12
2.5	Classificação dos problemas de balanceamento de linhas de montagem ..	14
2.6	Extensões ao problema de balanceamento de linhas de montagem	16
2.6.1	Restrições de afectação	16
2.6.2	Linhas paralelas	17
2.6.3	Postos de trabalho paralelos	18
2.6.4	Linhas de montagem em forma de U	19
2.6.5	CrITÉrios para avaliação da qualidade das soluções	19
2.7	Considerações estratégicas	21
3	Abordagens utilizadas no balanceamento de linhas de montagem	23
3.1	Introdução	24
3.2	Abordagens utilizadas no balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples	24
3.2.1	Métodos optimizantes	24
3.2.2	Métodos heurísticos	26
3.2.2.1	Métodos construtivos	26
3.2.2.2	Métodos de melhoramento	29
3.2.3	Métodos de simulação e de apoio à decisão	31
3.3	Abordagens utilizadas no balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto	32
3.3.1	Métodos optimizantes	32
3.3.2	Métodos heurísticos	33
3.3.2.1	Métodos construtivos	34

3.3.2.2	Métodos de melhoramento	34
3.3.3	Métodos de simulação e de apoio à decisão.....	36
4	Modelos para o balanceamento de linhas de montagem	38
4.1	Introdução	39
4.2	A utilização de postos paralelos em linhas de montagem	39
4.3	Balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples	41
4.3.1	Modelo de programação matemática	41
4.3.2	Algoritmo geral de recristalização simulada.....	44
4.3.3	Heurística proposta	47
4.3.3.1	Primeira fase	48
4.3.3.2	Segunda fase	52
4.3.3.3	Parâmetros de controlo	52
4.3.3.4	Exemplo numérico	53
4.3.4	Experiência computacional	58
4.3.4.1	Comparação com problemas referidos na literatura....	58
4.3.4.2	Limite inferior para o número de postos de trabalho ..	61
4.3.4.3	Testes a problemas gerados	64
4.4	Balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto	65
4.4.1	Modelo de programação matemática	66
4.4.2	Heurística proposta	69
4.4.2.1	Primeira fase	70
4.4.2.2	Segunda fase	71
4.4.2.3	Exemplo numérico	73
4.4.3	Experiência computacional.....	75
4.4.3.1	Limite inferior para o número de postos de trabalho ..	76
4.4.3.2	Testes a problemas gerados	77
5	Em conclusão.....	79
5.1	Conclusões gerais.....	80
5.2	Perspectivas de desenvolvimento futuro	82
	Referências bibliográficas.....	83
Apêndice A	Construção de um diagrama de precedências.....	90
Apêndice B	Gerador de problemas.....	92

Índice de figuras

Figura 2.1	Tipos de implantações fabris	7
Figura 2.2	Posicionamento dos vários tipos de sistemas de produção em função do perfil da procura	9
Figura 2.3	Modelo de programação binária para o PBLMS-I	13
Figura 2.4	Tipos básicos de problemas de balanceamento de linhas de montagem	14
Figura 2.5	Exemplo de uma linha de montagem com postos de trabalho paralelos	19
Figura 2.6	Exemplo de uma linha de montagem em forma de U	19
Figura 4.1	Modelo de programação matemática para o PBLMS-I com postos paralelos e restrições de zona	43
Figura 4.2	Curva de variação da temperatura para o algoritmo de recristalização simulada	45
Figura 4.3	Algoritmo geral de recristalização simulada	46
Figura 4.4	Esquema da heurística proposta para o balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples com postos paralelos e restrições de zona	48
Figura 4.5	Exemplo de uma solução de balanceamento	50
Figura 4.6	Diagrama de precedências para o exemplo numérico de uma linha de montagem de modelo-simples	53
Figura 4.7	Modelo de programação matemática para o problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto com postos paralelos e restrições de zona	68
Figura 4.8	Ilustração da heurística para o exemplo da linha de modelo-misto	75

Índice de tabelas

Tabela 4.1	Tempos de processamento das tarefas do exemplo numérico de uma linha de montagem de modelo-simples.....	53
Tabela 4.2	Valores dos pesos posicionais para o exemplo numérico de uma linha de modelo-simples	54
Tabela 4.3	Sequência de afectação das tarefas	55
Tabela 4.4	Afectação de tarefas para a solução inicial	56
Tabela 4.5	Afectação de tarefas para a solução A	56
Tabela 4.6	Afectação de tarefas para a solução B	57
Tabela 4.7	Afectação de tarefas para a melhor solução	57
Tabela 4.8	Comparação dos resultados para o problema de 70 tarefas	59
Tabela 4.9	Comparação dos resultados para o conjunto de problemas de Scholl (1993).....	60
Tabela 4.10	Comparação dos resultados para os problemas de Buxey (1974) e Schofield (1979).....	61
Tabela 4.11	Classificação das tarefas para o cálculo de L_p	62
Tabela 4.12	Resultados computacionais para os problemas de balanceamento de linhas de modelo-simples	64
Tabela 4.13	Tempos de processamento e pesos posicionais médios para o exemplo numérico de uma linha de modelo-misto	74
Tabela 4.14	Classificação das tarefas para o cálculo de LB_{pmix}	76
Tabela 4.15	Resultados computacionais para os problemas de balanceamento de linhas de modelo-misto	78

Introdução geral

Conteúdo

- Relevância do problema
- Objectivo da dissertação
- Estrutura da dissertação

1.1 Relevância do problema

Num mercado cada vez mais global e competitivo, as empresas industriais precisam de maximizar a eficiência com que utilizam os seus recursos, pois só assim conseguem minimizar os seus custos de produção e alcançar uma posição competitiva face aos seus concorrentes.

As operações de montagem são uma parte da cadeia de produção, definindo-se como “a agregação de todos os processos pelos quais diversos componentes e submontagens são reunidos e montados para formar um produto final ou montagem completa, através de um processo individual, em lote ou contínuo” (Nof et al, 1997).

A montagem de produtos de elevado consumo é, normalmente, efectuada em linhas de montagem, as quais consistem num conjunto de postos de trabalho dispostos sequencialmente e interligados por um sistema de transporte de materiais. Em cada posto de trabalho executa-se um conjunto de tarefas pré-especificadas num processo de montagem.

O problema de balanceamento de linhas de montagem consiste na determinação da afectação das tarefas, definidas num dado processo de montagem, aos postos de trabalho, por forma a minimizar uma determinada medida do tempo ou do custo envolvido nesse processo de montagem.

Estudos citados por Nof et al (1997) indicam que, quando se encaram as operações industriais de uma forma global, as operações de montagem representam mais de 50% do tempo total gasto na produção de bens e cerca de 20% dos custos totais de produção. Tipicamente, cerca de um terço da mão-de-obra de uma unidade industrial está envolvida em tarefas de montagem. Na indústria automóvel, 50% dos custos de mão-de-obra directa ocorrem na área de montagem, e na indústria de instrumentos de precisão estes custos situam-se entre 20% e 70%.

Estes dados evidenciam os elevados ganhos potenciais, em termos de tempo e custo de produção, que podem resultar da operação eficiente das linhas de montagem e, consequentemente, de um bom balanceamento das mesmas.

1.2 Objectivo da dissertação

O problema de balanceamento de linhas de montagem foi inicialmente formulado por Salveson (1955) e desde então inúmeras metodologias têm sido desenvolvidas para abordar este problema, a grande maioria das quais pressupõe que as linhas são dedicadas à montagem de um único produto.

As tendências actuais dos mercados mostram um aumento da procura de produtos personalizados, aumentando a pressão para a flexibilização da produção. Assim, as linhas dedicadas à montagem de um único produto estão a ser substituídas por linhas que permitem a montagem em simultâneo de diferentes variantes de um mesmo produto – linhas de modelo-misto.

Por outro lado, as metodologias convencionais para a resolução do problema de balanceamento de linhas de montagem requerem que cada tarefa seja afectada a um único posto de trabalho, donde resulta que a taxa de produção é limitada pelo tempo de processamento da tarefa mais longa. No entanto, a pressão crescente que é colocada sobre as empresas industriais para aumentarem os seus níveis de produção não é compatível com esta limitação.

Os aspectos referidos nos dois parágrafos anteriores serviram de motivação para o desenvolvimento de uma nova abordagem para o problema de balanceamento de linhas de montagem, a qual permite a resolução do problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto e a inclusão de postos de trabalho paralelos, que permitem aumentar a taxa de produção das linhas, para além do limite imposto pelo tempo de processamento da tarefa mais longa.

Assim, o principal objectivo deste trabalho é a apresentação de um conjunto de modelos e heurísticas que possibilitam esta nova abordagem ao problema de balanceamento de linhas de montagem.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. No presente capítulo faz-se uma breve introdução ao tema em estudo, releva-se a importância do problema e referem-se os principais objectivos do trabalho.

No segundo capítulo faz-se uma caracterização dos sistemas de produção discreta e o enquadramento das linhas de montagem neste tipo de sistemas. São

sistematizados os conceitos básicos relativos a linhas de montagem e é apresentada uma definição formal do problema de balanceamento. São também caracterizados os vários tipos de linhas de montagem e, no final deste capítulo, fazem-se algumas considerações estratégicas sobre seu o projecto.

No terceiro capítulo é feita uma revisão de modelos e algoritmos apresentados na literatura relevante para a resolução do problema. São analisados separadamente os problemas de balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples e de modelo-misto, sendo feita uma divisão entre métodos optimizantes e métodos heurísticos. É, também, revista a aplicação de métodos de simulação e de sistemas de apoio à decisão.

No quarto capítulo apresentam-se dois modelos de programação matemática desenvolvidos para formular o problema de balanceamento, um para linhas de modelo-simples e outro para linhas de modelo-misto. Este modelos permitem formular problemas com características que reflectem o ambiente industrial de um modo mais realista, como a existência de tempos de processamento superiores ao tempo de ciclo e restrições de afectação. Apresentam-se, também, as heurísticas, baseadas no algoritmo de recristalização simulada, desenvolvidas para a resolução dos problemas, bem como a experiência computacional e as conclusões relativas ao seu desempenho.

Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e as perspectivas de desenvolvimento futuro.

Enquadramento do problema de balanceamento de linhas de montagem

Conteúdo

- **Introdução**
- **Tipos de sistemas de produção discreta**
- **Conceitos básicos relativos a linhas de montagem**
- **Definição do problema de balanceamento de linhas de montagem**
- **Classificação dos problemas de balanceamento de linhas de montagem**
- **Extensões ao problema de balanceamento de linhas de montagem**
- **Considerações estratégicas**

2.1 Introdução

As diferentes características dos sistemas de produção podem originar diferentes formas de os classificar. Se se tomar em linha de conta a natureza do fluxo produtivo, as linhas de montagem classificam-se como sistemas de produção discreta, os quais se caracterizam por gerarem produtos individuais e claramente distinguíveis.

Os sistemas de produção discreta podem, por sua vez, ser classificados de acordo com a abordagem utilizada para agrupar os processos de fabrico. Esta classificação permite realçar os aspectos mais característicos das linhas de montagem, por comparação com outros tipos de sistemas de produção discreta.

Assim, o presente capítulo começa por caracterizar os diferentes tipos de sistemas de produção discreta, por forma a enquadrar as linhas de montagem num desses sistemas. Seguidamente, introduzem-se os conceitos básicos relativos a linhas de montagem e apresenta-se uma definição formal do problema de balanceamento de linhas de montagem. Finalmente, apresenta-se uma caracterização dos vários tipos de linhas de montagem e fazem-se algumas considerações estratégicas sobre o projecto deste tipo de linhas.

2.2 Tipos de sistemas de produção discreta

A classificação dos sistemas de produção discreta de acordo com a abordagem utilizada para agrupar os processos de fabrico e, consequentemente, definir a configuração da implantação fabril, resulta na definição dos seguintes tipos de sistemas: (i) posição fixa (do produto), (ii) processo, (iii) tecnologia de grupo e (iv) produto.

A implantação por posição fixa é utilizada em projectos de produtos de grandes dimensões, nos quais, ou a posição do produto está pré-determinada (por exemplo, construção de edifícios), ou os custos associados à movimentação do produto entre os diferentes postos de trabalho são proibitivos (por exemplo, construção naval). Nestes casos, o produto é fabricado ou montado numa localização fixa e a mão-de-obra ou os equipamentos movimentam-se de acordo com as necessidades.

Relativamente aos restantes três tipos de implantação fabril, as suas principais características estão esquematizadas na figura 2.1.

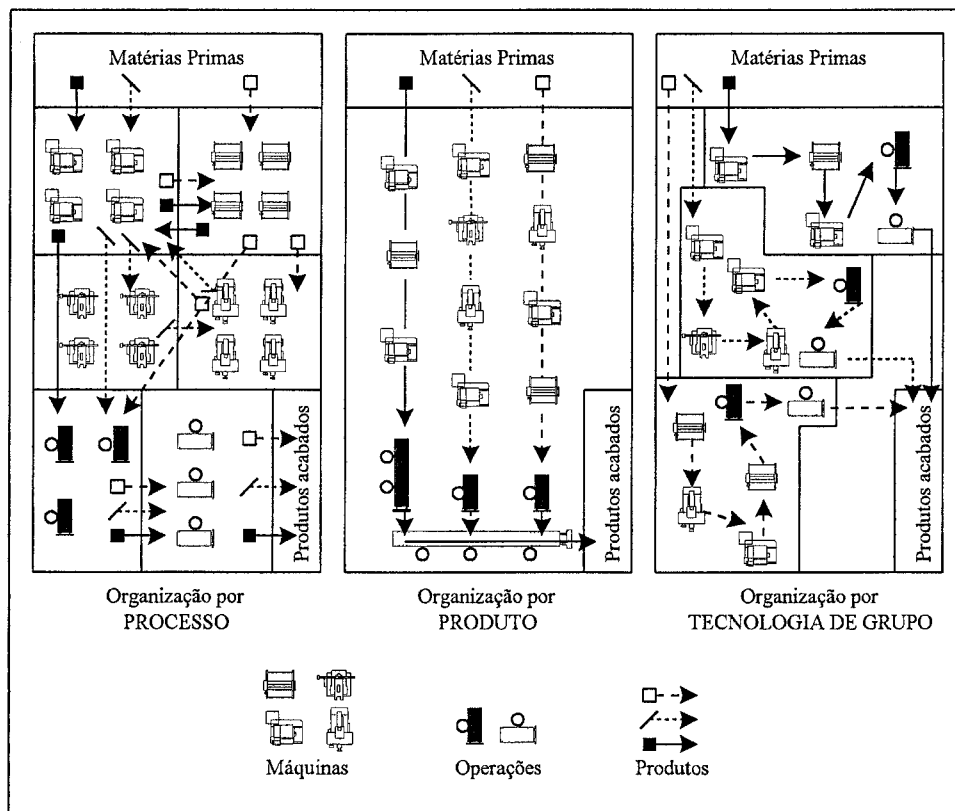


Figura 2.1 – Tipos de implantações fabris

Nos sistemas de produção por processo, os equipamentos são agrupados em departamentos de acordo com a sua funcionalidade. Assim, numa indústria metalo-mecânica, os tornos mecânicos são colocados numa determinada zona, as frezadoras noutra, etc.. Os componentes percorrem, segundo a sequência de operações respectiva, os diferentes departamentos para serem processados.

Este tipo de organização do processo produtivo caracteriza-se pelos seguintes aspectos:

- (i) a taxa de utilização dos equipamentos e da mão-de-obra é relativamente elevada, dado que se podem processar diferentes tipos de componentes;
- (ii) a flexibilidade é elevada, porque o sistema de produção é relativamente pouco sensível a modificações nos componentes a processar, como consequência da alargada gama de operações que cada tipo de equipamento pode efectuar;
- (iii) o controlo da produção é difícil, pois o número de diferentes tipos de componentes em processamento, em cada instante de tempo, é, normalmente, muito elevado;

- (iv) os ciclos de produção são longos, contribuindo, para tal, os relativamente elevados tempos de transporte, preparação de máquinas e espera pela disponibilidade de equipamento;
- (v) as existências em curso de fabrico são altas, como consequência dos ciclos de produção longos;
- (vi) os custos associados à movimentação de materiais são elevados, dada a dispersão dos equipamentos pela área fabril e pelo facto de o número de diferentes percursos ser praticamente igual ao número de diferentes componentes a processar;
- (vii) a mão-de-obra é especializada numa determinada função, mas a variedade de diferentes tarefas que realiza é elevada, o que leva a uma alta motivação.

Na implantação por produto coexistem uma ou mais linhas de produção independentes, sendo os equipamentos de cada linha dedicados ao fabrico de um único componente (ou produto). No caso de um mesmo processo ser requerido por componentes diferentes, é necessária a duplicação do equipamento associado em cada uma das linhas que o utilizam.

Existem dois tipos de implantação por produto: (i) a linha de produção e (ii) a linha de montagem. Em ambos os casos os postos de trabalho estão colocados sequencialmente, de uma forma linear, e interligados por um sistema de transporte de materiais. O produto movimenta-se ao longo da linha percorrendo os vários postos de trabalho até terem sido executadas todas as operações.

Nas linhas de montagem as tarefas são realizadas fundamentalmente por operadores humanos e as máquinas são praticamente utilizadas apenas em operações auxiliares como, por exemplo, inspecção e teste. Daqui resulta que o investimento em capital fixo é relativamente reduzido e, consequentemente, os custos de operação são os mais importantes. As linhas de produção, pelo contrário, utilizam geralmente equipamento especializado e relativamente pouca mão-de-obra. O custo do investimento é normalmente muito elevado, ao qual se contrapõe um custo de operação comparativamente reduzido.

Relativamente aos sistemas de produção organizados por processo, os sistemas organizados por produto apresentam as seguintes vantagens e desvantagens:

- (i) os ciclos de produção são muito menores do que nos sistemas organizados por processo, uma vez que o fluxo de produção é praticamente contínuo;
- (ii) o custo de transporte de materiais é baixo, dado que a movimentação manual de materiais é quase inexistente;
- (iii) as existências em curso de fabrico são baixas, devido ao reduzido ciclo de produção;
- (iv) o sistema de controlo de produção é simples, porque o fluxo produtivo é linear e, normalmente, mecanizado;
- (v) a flexibilidade do sistema de produção é baixa, dado o elevado custo de reconversão das linhas de produção para a manufatura de outros produtos;
- (vi) a motivação da mão-de-obra é normalmente baixa, uma vez que os trabalhadores se especializam num número reduzido de tarefas que repetem vezes sem conta.

Na configuração dos sistemas de produção por tecnologia de grupo, os equipamentos são associados por forma a que cada grupo (célula de produção) seja maioritariamente, se não exclusivamente, dedicado ao processamento de uma família de componentes. Desta forma, consegue-se obter um sistema que reúne algumas das vantagens de uma configuração por produto e às quais se associam a flexibilidade, a taxa de utilização do equipamento e a motivação da mão-de-obra de um sistema organizado por processo.

É possível associar um determinado perfil de procura (em função da quantidade e da variedade dos produtos a produzir) a cada um dos tipos de sistemas de produção atrás descritos. Na figura 2.2 ilustra-se esta relação.

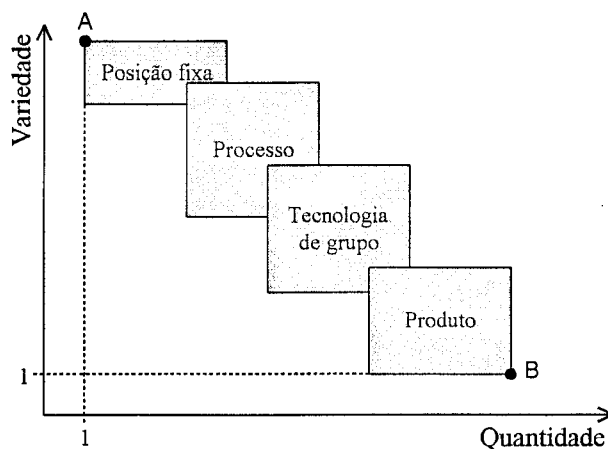


Figura 2.2 – Posicionamento dos vários tipos de sistemas de produção em função do perfil da procura

Os pontos A e B correspondem a situações extremas no que diz respeito à variedade e à quantidade de produtos fabricados no sistema de produção. O sistema de produção identificado com a letra A produz um grande número de produtos diferentes em lotes de uma unidade. O sistema de produção B corresponde ao extremo oposto, em que é produzido um único produto em grandes quantidades, para satisfazer a elevada procura.

O facto de os sistemas de produção por produto serem aplicados em condições de elevada procura, faz com que, no seu projecto, seja crítico garantir taxas de utilização muito elevadas. Assim, o principal problema do projecto deste tipo de sistemas é a divisão das tarefas entre os diferentes postos de trabalho por forma a obter-se um fluxo contínuo, ou seja, tempos de processamento igualmente distribuídos. Este problema é usualmente designado por balanceamento de linhas e é sobre ele que incide este trabalho.

2.3 Conceitos básicos relativos a linhas de montagem

Uma **linha de montagem** é um conjunto de **postos de trabalho** dispostos sequencialmente e interligados por um sistemas de transporte de materiais. Em cada posto de trabalho é executado um conjunto de **tarefas** (ou operações) pré-especificadas num **processo de montagem**, no qual os seguintes aspectos são definidos:

- (i) **Tempo de processamento da tarefa:** o tempo requerido para executar uma dada tarefa.
- (ii) **Restrições de precedência:** o conjunto de restrições que determina a sequência segundo a qual as tarefas podem ser executadas; as restrições de precedência são definidas por aspectos tecnológicos ou de concepção do produto.

Note-se que uma **tarefa** é uma unidade de trabalho produtiva e indivisível, ou seja, é um elemento de trabalho que acrescenta valor e que não pode ser subdividido sem que isso crie trabalho adicional.

As restrições de precedência são normalmente representadas através de um **diagrama de precedências** composto por nós numerados, que representam as tarefas, e por arcos dirigidos entre os pares de tarefas sobre os quais existe uma

relação de precedência. No Apêndice A é ilustrado um exemplo de construção de um diagrama de precedências (adaptado de Buffa e Sarin (1987, pp 662-664)).

Num posto de trabalho típico o trabalho é executado manualmente por operadores humanos usando ferramentas simples ou por máquinas semi-automáticas controladas por esses operadores. No caso de postos de trabalho totalmente automáticos, o termo **operador** é também utilizado. O tempo necessário para realizar a totalidade das tarefas afectadas a um posto de trabalho é denominado **carga** (do posto de trabalho). Um posto de trabalho diz-se mais a montante do que outro, quando está mais próximo do início da linha de montagem (o fluxo da linha é de montante para jusante). Quando, numa linha de montagem, existem postos paralelos, utiliza-se o termo **estação** para identificar o conjunto de tarefas a realizar e **posto de trabalho** para identificar o operador, podendo uma estação ter mais do que um posto de trabalho.

Numa linha de montagem **síncrona** cada posto de trabalho dispõe de um intervalo de tempo pré-definido, designado por **tempo de ciclo**, para completar o conjunto de tarefas que lhe está atribuído. A linha é operada por forma a que, em cada instante, todos os postos estão ocupados, pelo que, quando num determinado posto de trabalho se esgota o tempo de ciclo, a montagem deve ser transferida para o posto seguinte, recebendo o primeiro uma montagem do posto anterior. O tempo de ciclo determina, assim, a taxa de produção da linha de montagem. Como as tarefas são indivisíveis, o tempo de ciclo, nas linhas de montagem sem postos paralelos, não pode ser menor do que o tempo de processamento da tarefa mais longa. A diferença positiva entre o tempo de ciclo e a carga de um posto é denominada **tempo inactivo do posto**. O somatório dos tempos inactivos de todos os postos de trabalho é denominado **tempo inactivo da linha**.

Numa linha de montagem **assíncrona**, não existe um intervalo de tempo fixo para que cada posto realize as tarefas que lhe estão afectadas, pelo que é necessário colocar armazéns intermédios (“buffers”) entre os postos de trabalho. Quando um posto termina as tarefas numa montagem, coloca-a no armazém intermédio situado a jusante e reinicia as tarefas numa nova montagem proveniente do armazém intermédio situado a montante. Neste trabalho apenas se analisa o problema de balanceamento associado às linhas de montagem síncronas.

2.4 Definição do problema de balanceamento de linhas de montagem

O problema de balanceamento de linhas de montagem simples (PBLMS) foi inicialmente formulado por Salveson (1955) e consiste na afectação de um conjunto de tarefas a um conjunto de estações, com o objectivo de minimizar o número de estações ou o tempo de ciclo da linha (ambos são equivalentes a minimizar o tempo inactivo da linha).

A afectação de tarefas a postos de trabalho é efectuada por forma a assegurar que a linha de montagem possa satisfazer o ritmo da procura e cumprir as seguintes condições (Shtub e Dar-El, 1990):

- (i) uma tarefa não pode ser dividida, tendo que ser realizada por completo num único posto de trabalho;
- (ii) a sequência de tarefas afectadas tem que respeitar as precedências tecnológicas;
- (iii) todos os postos de trabalho têm condições para realizar qualquer tarefa;
- (iv) os tempos de processamento das tarefas são conhecidos e são independentes do posto de trabalho em que se realizam;
- (v) o somatório dos tempos de processamento das tarefas afectadas a cada posto de trabalho não pode exceder o tempo de ciclo, determinado pela procura do produto.

Existem duas formulações para o problema de balanceamento de linhas de montagem simples (Baybars, 1986a):

- **PBLMS-I:** minimizar o número de postos de trabalho para um dado tempo de ciclo.
- **PBLMS-II:** minimizar o tempo de ciclo para um dado número de postos de trabalho.

O PBLMS-I é utilizado para desenhar uma linha de montagem nova cuja procura pode ser facilmente estimada, uma vez que o tempo de ciclo e, por conseguinte, a taxa de produção têm que ser especificados como parâmetros fixos. Pelo contrário, o PBLMS-II lida com a maximização da taxa de produção numa linha de montagem existente. Este problema pode surgir quando mudanças no processo produtivo ou na

estrutura da procura levam a uma alteração do sistema de produção. O presente trabalho concentra-se, fundamentalmente, no problema do tipo I.

O PBLMS-I pode ser modelizado como um problema de programação binária, conforme se apresenta na figura 2.3, no qual:

- N é o número de tarefas;
- S é o número máximo de estações;
- C é o tempo de ciclo;
- t_i é o tempo de processamento da tarefa i ;
- F_a é o conjunto de tarefas que só podem ser executadas depois da tarefa a estar concluída (tarefas sucessoras de a);
- $x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa } i \ (i = 1, \dots, N) \text{ é executada no posto de trabalho } k \ (k = 1, \dots, S) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Minimizar	$\sum_{k=1}^S k \cdot x_{Nk} \quad (1)$	(1)
Sujeito a	$\sum_{k=1}^S x_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$	(2)
	$\sum_{k=1}^S x_{ak} - \sum_{k=1}^S x_{bk} \leq 0 \quad a \in N, b \in F_a \quad (3)$	(3)
	$\sum_{k=1}^S t_i \cdot x_{ik} \leq C \quad k = 1, 2, \dots, S \quad (4)$	(4)
	$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, S \quad (5)$	(5)

Figura 2.3 – Modelo de programação binária para o PBLMS-I

A função objectivo (1) minimiza o índice da estação à qual é afectada a última tarefa do diagrama de precedências (a tarefa com índice N), o que corresponde a minimizar o número total de estações – tal é garantido pelo facto de a última tarefa só poder ser afectada depois de todas as outras já o estarem. Note-se que este modelo pressupõe que as tarefas são numeradas da origem para o final do diagrama de precedências e que nenhuma tarefa pode preceder outra cujo número de identificação é menor (se $b \in F_a$ então $a < b$).

O conjunto de restrições (2) garante que cada tarefa é afectada a uma e uma só estação. As restrições (3) obrigam a que a afectação respeite as relações de precedência entre as tarefas, ou seja, a que o índice do posto a que está afectada determinada tarefa seja necessariamente não superior ao índice das estações a que

estão afectadas as tarefas que lhe sucedem no diagrama de precedências. O conjunto de restrições (4) garante que o tempo de ciclo não é excedido em cada estação. Finalmente, o conjunto (5) define o domínio das variáveis de decisão.

O problema de balanceamento de linhas de montagem é um problema de optimização combinatória NP-completo (Garey e Johnson, 1979). Isto significa que a resolução óptima de problemas de grande dimensão não é possível em tempo útil e explica o grande interesse dos investigadores no desenvolvimento de heurísticas para a resolução deste problema.

2.5 Classificação dos problemas de balanceamento de linhas de montagem

O problema de balanceamento de linhas de montagem simples, apresentado na secção anterior, é apenas uma das variantes possíveis do problema de balanceamento de linhas de montagem. Nesta secção caracterizam-se estas variantes, tendo por base a classificação ilustrada na figura 2.4, a qual tem em conta o número de produtos montados na linha e a natureza dos tempos de processamento das tarefas (ver, por exemplo, Erel e Sarin, 1998).

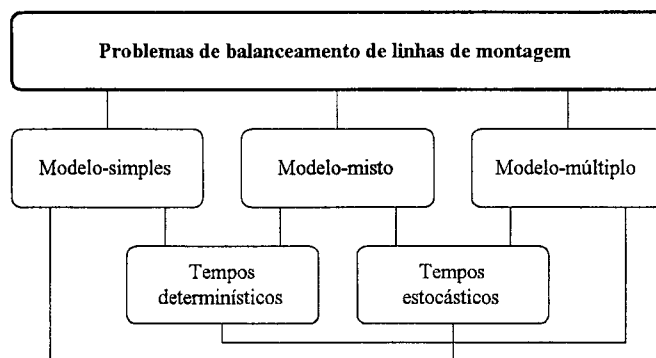


Figura 2.4 – Tipos básicos de problemas de balanceamento de linhas de montagem

Relativamente ao número de produtos, existem, basicamente, três tipos de linhas de montagem:

- (i) Linhas de modelo-simples, onde um produto homogéneo é continuamente produzido em grandes quantidades.
- (ii) Linhas de modelo-misto, onde vários modelos do mesmo produto são produzidos simultaneamente. Quando a procura de um produto não é

suficiente para justificar uma linha de montagem independente, pode-se utilizar uma linha de montagem de modelo-misto para montar um produto que tem diferentes variantes, desde que as tarefas e os diagramas de precedência de cada uma destas variantes sejam semelhantes. Os vários modelos são produzidos simultaneamente na linha, numa sequência intermitente.

- (iii) Linhas de modelo-múltiplo, onde lotes de vários produtos semelhantes são montados na mesma linha. Estes produtos têm normalmente algumas diferenças significativas nos processos de montagem, que obrigam a modificações nos equipamentos da linha entre cada lote (“set-up” da linha).

A natureza dos tempos de processamento considerados na modelização do problema do balanceamento pode ser de dois tipos:

- (i) Tempos de processamento determinísticos – a utilização de valores fixos é justificada quando a variabilidade esperada dos tempos de processamento é pequena. Em grande parte das linhas de montagem cujas operações são efectuadas por operadores humanos, o número de tarefas afectadas a cada posto de trabalho é relativamente pequeno e cada uma destas tarefas é, normalmente, muito simples. Assim, apesar de existir variabilidade associada à utilização de operadores humanos, esta é muito atenuada devido aos aspectos atrás referidos, não se justificando aumentar a complexidade dos modelos pela introdução de tempos estocásticos.
- (ii) Tempos de processamento estocásticos – neste caso é considerada a variabilidade dos tempos de processamento. Por um lado, quando as tarefas desempenhadas pelos operadores são longas ou complexas, deve-se entrar em linha de conta com a possibilidade de haver variações significativas nos tempos de processamento, que podem afectar consideravelmente o desempenho do sistema. Por outro lado, apesar de nas linhas automatizadas os tempos de processamento serem praticamente constantes, podem ocorrer avarias nas máquinas, o que provoca variabilidade da taxa de produção, pelo que as probabilidades de avaria devem ser incorporadas nos modelos de balanceamento (Chow, 1987).

2.6 Extensões ao problema de balanceamento de linhas de montagem

O problema de balanceamento de linhas de montagem simples do tipo I, descrito na secção 2.4, tem as seguintes características:

- a linha de montagem está totalmente dedicada à produção de um produto homogéneo;
- a linha de montagem tem um tempo de ciclo fixo;
- os tempos de processamento são determinísticos;
- as únicas restrições consideradas são as de precedência;
- a linha tem uma implantação em série, onde os operadores trabalham apenas de um lado;
- qualquer posto de trabalho pode realizar qualquer tarefa;
- o abastecimento da linha é feito a uma taxa fixa igual ao tempo de ciclo.

Relativamente aos tipos de problema descritos na secção anterior, o PBLMS-I é o mais simples, mas a sua aplicabilidade a sistemas do mundo real é limitada, dado que não incorpora algumas características neles presentes. Nos pontos seguintes apresentam-se alguns aspectos que podem ser incorporados nos modelos para o problema do balanceamento de linhas de montagem, por forma a que melhor reflectam a realidade industrial.

2.6.1 Restrições de afectação

As restrições de afectação reduzem a gama de postos de trabalho em que uma determinada tarefa pode ser realizada. Existem vários tipos de restrições de afectação que, de seguida, se descrevem:

- (i) Restrições relacionadas com as tarefas ou restrições de zona – estas restrições impedem ou forçam a afectação de diferentes tarefas ao mesmo posto de trabalho, sendo denominadas restrições de incompatibilidade ou compatibilidade, respectivamente.

As restrições de incompatibilidade entre tarefas são, normalmente, impostas por questões tecnológicas como, por exemplo, quando é necessário forçar um tempo mínimo entre a realização dessas tarefas ou quando não é possível

realizá-las no mesmo posto de trabalho, normalmente, por questões de segurança (Deckro, 1989).

As restrições de compatibilidade entre tarefas advêm, normalmente, de aspectos relacionados com o equipamento utilizado. Por exemplo, se duas tarefas requerem o mesmo equipamento ou têm condições de processamento idênticas (temperatura, pressão, nível de qualificação dos operadores, etc.) é desejável que sejam afectadas ao mesmo posto de trabalho (Gunther et al, 1983).

- (ii) Restrições relacionadas com os postos de trabalho – se uma determinada máquina só está disponível num determinado posto de trabalho, então, as tarefas que a requerem têm obrigatoriamente que ser realizadas nesse posto (Johnson, 1983).
- (iii) Restrições relacionadas com a posição – no caso de produtos de grandes dimensões (como, por exemplo, automóveis ou electrodomésticos da linha branca), o transporte entre postos de trabalho é efectuado mecanicamente, pelo que a posição das peças é fixa. Nestes casos, pode ser necessário efectuar montagens de ambos os lados da linha, o que requer mais do que um operador. Pode, por isso, ser conveniente agrupar as tarefas em função da posição da montagem.
- (iv) Restrições relacionadas com os operadores – dependendo da sua complexidade, as tarefas requerem níveis diferentes de qualificação e experiência dos operadores. A qualificação requerida a um operador é determinada pela tarefa mais complicada afectada ao respectivo posto (Johnson (1983) e Gunther et al (1983)). Do ponto de vista ergonómico, será desejável combinar tarefas monótonas e tarefas mais variáveis no mesmo posto de trabalho para serem conseguidos maiores níveis de satisfação com o trabalho e motivação dos operadores.

2.6.2 Linhas paralelas

Com o objectivo de aumentar a flexibilidade e diminuir a sensibilidade a falhas do sistema de produção, pode ser vantajoso instalar várias linhas paralelas para a montagem de um ou vários produtos. A existência de linhas paralelas possibilita uma resposta pronta a variações da procura, pois o número de linhas em funcionamento

pode ser alterado. O risco de paragens da produção devido a avarias de máquinas diminui. Além disso, a utilização de linhas paralelas permite o aumento do tempo de ciclo, o que traz várias vantagens, tais como: (i) a obtenção de melhores balanceamentos, devido ao maior número de combinações possíveis de tarefas e (ii) o enriquecimento do trabalho, uma vez que os operadores passam a desempenhar um maior número de tarefas diferentes. Neste contexto, surge o problema de decisão estratégica que consiste em determinar o número óptimo de linhas de montagem, já que o aumento do número de linhas implica maior investimento de capital.

Note-se, contudo, que uma das principais vantagens da utilização de linhas de montagem advém do facto de se poder utilizar mão-de-obra pouco qualificada, a qual pode ser facilmente formada, devido à divisão estrita do trabalho. Quando se replicam linhas de montagem, o número de tarefas que cada trabalhador tem que efectuar aumenta (no caso extremo pode-se ter tantas linhas, com um único posto de trabalho, quantas as necessárias para satisfazer a procura do produto), e a referida vantagem tende a desaparecer. A consideração deste aspecto na decisão de replicar linhas de montagem é da maior importância. No planeamento de linhas de montagem paralelas, além do problema do balanceamento das linhas, também deve ser considerado o problema da afectação dos produtos e da mão-de-obra às linhas instaladas (Lehman (1969), Globerson e Tamir (1980), Ahmadi et al (1992)).

2.6.3 Postos de trabalho paralelos

Quando, numa determinada linha, a taxa de produção requerida para satisfazer a procura é tão elevada que os tempos de processamento de algumas tarefas excedem o tempo de ciclo especificado, é necessário utilizar postos de trabalho paralelos.

A linha de montagem passa, assim, a ser composta por estações de trabalho em que cada uma delas contém um certo número de postos de trabalho idênticos que efectuem simultaneamente o mesmo conjunto de tarefas, o que permite reduzir o tempo de ciclo da linha.

A utilização de postos paralelos é exemplificada na figura 2.5. A estação 1 não apresenta paralelismo, ou seja, apenas um operador executa as tarefas **a** e **b**. A estação 2 é constituída por dois postos de trabalho onde paralelamente são executadas as tarefas **d**, **e** e **f**.

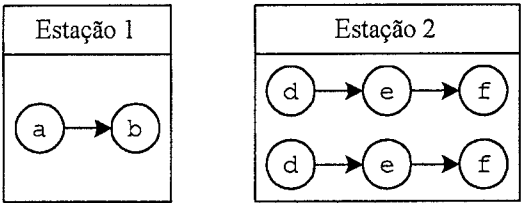


Figura 2.5 – Exemplo de uma linha de montagem com postos de trabalho paralelos

O uso de postos de trabalho paralelos é uma prática comum e eficaz permitindo uma afectação de tarefas mais flexível (McMullen e Frazier, 1998a). A maior vantagem da utilização de postos paralelos é a possibilidade de se conseguir uma taxa de produção superior àquela que é imposta pelo maior tempo de processamento (Buxey, 1974). No entanto, tal como para o caso das linhas paralelas, a replicação não controlada de postos de trabalho pode pôr em causa uma das principais vantagens da utilização de linhas de montagem – o recurso a mão-de-obra pouco qualificada.

2.6.4 Linhas de montagem em forma de U

O aparecimento das linhas em forma de U tem origem na implementação dos princípios “just-in-time” nas implantações fabris. Nas linhas de montagem em forma de U, as duas extremidades da linha encontram-se próximas uma da outra formando um “U”, podendo os operadores trabalhar nos dois segmentos da linha, como se pode observar na figura 2.6.

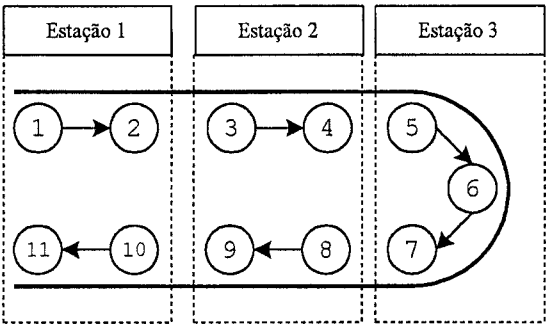


Figura 2.6 – Exemplo de uma linha de montagem em forma de U

Os operadores estão envolvidos em diferentes partes do processo produtivo, alargando, assim, as suas habilidades e experiência. Os postos estão mais próximos, o que melhora a visibilidade sobre todo o processo, a comunicação entre os operadores e a possibilidade de entreajuda, no caso de congestionamento. Os

modelos para o balanceamento de linha $\bar{t}$ s de montagem em forma de U têm uma particularidade no que diz respeito às restrições de precedência. Enquanto que nas linhas em série as tarefas que sucediam a uma determinada tarefa não podiam ser afectadas a postos anteriores, no caso das linhas em U isso já pode acontecer. Esta relaxação aumenta a eficiência da linha de montagem, equilibrando melhor a carga de trabalho entre os postos.

2.6.5 Critérios para avaliação da qualidade das soluções

Vários critérios de carácter técnico e económico têm vindo a ser incluídos nos modelos de balanceamento de linhas de montagem, para avaliar a qualidade das soluções obtidas. Segundo Ghosh e Gagnon (1989), os critérios mais utilizados, de carácter técnico, são (i) a minimização do número de postos de trabalho e (ii) a minimização do tempo inactivo da linha. Quanto aos critérios de carácter económico, que estão relacionados com os custos de operação da linha de montagem, os mais utilizados são (i) o custo da mão-de-obra, (ii) o custo do tempo inactivo e (iii) o custo das unidades incompletas.

Outro critério frequentemente encontrado na literatura é o equilíbrio das cargas de trabalho entre os diferentes postos (ver, por exemplo, Merengo et al (1999) e Matanachai e Yano (2001)).

Vários autores apresentam abordagens multi-critério ao problema do balanceamento de linhas de montagem. Shtub e Dar-El (1990) consideram em simultâneo (i) a minimização do tempo inactivo da linha e (ii) a minimização do número de componentes presentes em cada posto de trabalho.

Malakooti (1991) faz uma abordagem multi-critério onde são avaliados três objectivos: (i) o número de postos de trabalho, (ii) o tempo de ciclo e (iii) os custos de operação da linha. Em Malakooti (1994) é feita uma extensão ao trabalho anterior onde são incluídos armazéns intermédios na linha de montagem. Assim, a nova abordagem considera, para além dos objectivos atrás referidos, a dimensão dos armazéns intermédios.

McMullen e Frazier (1998a) consideram critérios multi-objectivo que têm em conta (i) o custo da mão-de-obra e equipamento utilizado, (ii) o equilíbrio das cargas

de trabalho entre os diferentes postos e (iii) a probabilidade de ocorrerem atrasos relativamente aos prazos de entrega previstos.

Ponnambalam et al (2000) consideram (i) o número de postos de trabalho, (ii) o equilíbrio das cargas de trabalho entre os diferentes postos e (iii) a eficiência da linha de montagem, como critérios de avaliação das soluções de balanceamento.

2.7 Considerações estratégicas

Num sistema de produção com linhas de montagem, os custos de operação têm um forte impacto no custo final do produto, sendo essencialmente devidos ao custo da mão-de-obra. Assim, é importante projectar o sistema por forma a que a produtividade da mão-de-obra seja maximizada (e o tempo inactivo minimizado), o que só se consegue através de um balanceamento eficiente da linha

Além do balanceamento de um sistema novo, é necessário re-balancear periodicamente um sistema existente após mudanças no processo produtivo ou na procura do mercado (Chow, 1990).

Assim, para projectar um sistema de linhas de montagem, vários factores devem ser tidos em conta (Ghosh e Gagnon, 1989):

- (i) Linha *versus* nenhuma linha – a primeira questão é saber se um sistema de produção organizado por linha de montagem é o mais indicado para o(s) produto(s) em questão.
- (ii) Número de modelos – como já foi referido na secção 2.5 consoante o número e tipo de modelos a produzir, a linha de montagem pode ser de modelo-simples, modelo-misto ou modelo-múltiplo.
- (iii) Dimensão da linha – é necessário estimar o número aproximado de operadores que a linha precisa para ser operada.
- (iv) Configuração da linha – dependendo das características do processo de montagem e da implantação fabril a linha pode ter uma configuração linear, circular, em forma de U, ou outra qualquer que melhor se adapte a essas características.
- (v) Sincronismo – as linhas podem ser síncronas ou assíncronas, como já foi referido. Em ambos os casos é necessário definir qual o melhor mecanismo de transporte de materiais entre os postos de trabalho.

- (vi) Material de manuseamento – é essencial escolher as ferramentas e equipamentos que melhor se adequam ao processo.
- (vii) Características do posto de trabalho – o operador (humano) pode executar as suas tarefas em várias posições (sentado, em pé, acompanhando a linha, etc.), devendo ser escolhida aquela que apresenta um melhor compromisso entre a produtividade e o bem estar do operador.

Para além destes aspectos de carácter operacional, os aspectos comportamentais da força de trabalho devem também ser analisados na concepção de sistemas de linhas de montagem. Enquanto que, por um lado, a aprendizagem através da execução repetida de tarefas faz aumentar a eficiência, por outro, faz diminuir a motivação e a satisfação dos operadores. É então fundamental estabelecer um compromisso entre a repetitividade e o enriquecimento do trabalho na linha de montagem.

Abordagens utilizadas no balanceamento de linhas de montagem

Conteúdo

- **Introdução**
- **Abordagens utilizadas no balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples**
- **Abordagens utilizadas no balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto**

3.1 Introdução

O problema de balanceamento de linhas de montagem foi inicialmente formulado por Salveson (1955) e, desde então, inúmeros procedimentos têm sido desenvolvidos para a sua resolução, sendo a literatura existente nesta área muito extensa. Revisões bibliográficas abrangentes foram efectuadas por Talbot et al (1986), Baybars (1986a), Ghosh e Gagnon (1989) e por Lima Fernandes e Groover (1995), tendo-se estes últimos autores concentrado exclusivamente nas linhas de modelo-misto.

Neste capítulo, revêm-se os métodos que foram determinantes para a evolução da investigação nesta área, bem como as técnicas propostas mais recentemente. Na apresentação dos modelos e técnicas para a resolução do problema do balanceamento de linhas de montagem que se segue, é feita uma divisão entre os métodos utilizados para as linhas de modelo-simples e de modelo-misto, e entre métodos optimizantes, que são bastante restritos na aplicabilidade a problemas reais, e métodos heurísticos, muito mais abrangentes. Algumas metodologias que utilizam os conceitos de simulação ou sistemas de apoio à decisão são também referidas.

3.2 Abordagens utilizadas no balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples

3.2.1 Métodos optimizantes

Os métodos optimizantes para o problema de balanceamento de linhas de montagem do tipo I baseiam-se normalmente no algoritmo de “branch-and-bound”. Scholl (1999) faz uma descrição detalhada deste tipo de métodos e da sua aplicação ao problema de balanceamento de linhas de montagem.

De entre os métodos optimizantes mais referidos na literatura para o PBLMS-I, destacam-se FABLE (Johnson, 1988), OptPack (Nourie e Venta, 1991), EUREKA (Hoffmann, 1992) e SALOME (Scholl e Klein (1997)). Todos estes algoritmos utilizam procedimentos de “branch-and-bound” aplicando uma estratégia de pesquisa em profundidade do tipo “laser”. Pelo método de pesquisa em profundidade, um ramo da árvore de pesquisa é totalmente explorado até ser encontrado um nó cujo problema de programação linear associado apresente uma solução óptima inteira. No

caminho de volta para a raiz, a pesquisa segue para o primeiro ramo alternativo que aparece, ou seja, cada nó é completamente ramificado antes de serem os nós do nível anterior. No caso na pesquisa “laser” é gerado e explorado apenas um nó descendente de cada vez.

No caso dos dois primeiros métodos (FABLE e OptPack) selecciona-se em cada nó uma única tarefa, a qual é afectada ao posto de trabalho mais a montante com capacidade disponível (este tipo de procedimentos dizem-se orientados pelas tarefas). A ordem segundo a qual os nós da árvore são gerados é definida de acordo com um conjunto de regras de prioridade. A principal diferença entre estes dois procedimentos reside no facto de o método OptPack partir de uma solução inicial obtida recorrendo a uma heurística, ao passo que o método FABLE não parte de uma solução inicial.

O algoritmo EUREKA (Hoffmann, 1992) é um procedimento orientado pelas estações, ou seja, em cada nó é preenchida por completo uma estação. Este procedimento executa, em primeiro lugar, uma pesquisa baseada no diagrama de precedências e, de seguida, uma pesquisa baseada no diagrama de precedências invertido. Quando não é encontrada uma solução óptima no espaço de tempo desejado o algoritmo permite a determinação de uma solução através de uma heurística

O procedimento SALOME (Scholl e Klein, 1997) baseia-se nas principais ideias dos procedimentos FABLE e EUREKA, incorporando ideias inovadoras como, por exemplo, a enumeração bidireccional, ou seja, em cada nó é decidido, dinamicamente, qual o sentido que a pesquisa deve tomar (o sentido do diagrama de precedências ou o sentido inverso). Segundo Scholl e Klein (1999b), SALOME é actualmente o procedimento mais eficaz para resolver de forma óptima o PBLMS-I.

Sprecher (1999) apresenta um método que consiste na adaptação de um procedimento de resolução do problema de escalonamento de projectos com recursos escassos (“resource-constraint project scheduling”) ao PBLMS-I. A pesquisa é orientada pelas tarefas, bidireccional, e uma série de limites inferiores e testes lógicos são aplicados. Segundo o autor, o algoritmo compete com os melhores métodos que existem para a resolução do PBLMS-I.

Amen (2000) propõe um procedimento “branch-and-bound” bidireccional que minimiza os custos de produção unitários, em vez do tradicional número de estações geralmente utilizado neste tipo de algoritmos.

Os métodos de optimização referidos apenas abrangem a versão mais simples do problema de balanceamento de linhas de montagem, não permitindo a inclusão de postos paralelos, ou de restrições relacionadas com as tarefas, postos de trabalho ou operadores.

Pinto et al (1975, 1981) apresentam procedimentos “branch-and-bound” que permitem o paralelismo de postos de trabalho, no entanto, a resolução óptima é apenas possível para problemas com um pequeno número de tarefas.

O algoritmo “branch-and-bound” proposto por Johnson (1983) pretende resolver problemas com algumas irregularidades, tais como restrições de afectação e paralelismo, no entanto, a sua aplicação só é possível para problemas de pequena dimensão. Para os casos mais gerais do problema de balanceamento de linhas de montagem ainda não foi desenvolvido nenhum procedimento de optimização que consiga resolver problemas de elevada dimensão.

3.2.2 Métodos heurísticos

Como já foi referido no capítulo anterior, o problema de balanceamento de linhas de montagem é NP-completo, logo a optimização de um problema de elevada dimensão pode não ser possível em tempo real. Por esse motivo, um grande número de procedimentos heurísticos tem sido desenvolvido para resolver este problema (ver, por exemplo, Talbot et al (1986), Ghosh e Gagnon (1989) e Erel e Sarin (1998)), podendo ser classificados em (i) métodos construtivos, que dão origem apenas a uma solução e (ii) métodos de melhoramento, que têm por objectivo melhorar uma solução inicial determinada por um método construtivo.

3.2.2.1 Métodos construtivos

Os métodos heurísticos mais simples são aqueles que se baseiam em regras de prioridade para a construção das soluções. Este tipo de procedimento consiste na ordenação das tarefas, disponíveis para afectação a uma determinada estação,

segundo uma regra de prioridade, que reflecte certas características das tarefas e do diagrama de precedências.

O procedimento RPW (“Ranked Positional Weight”) desenvolvido por Helgeson e Birnie (1961) é uma das referências para este tipo de heurística. A afectação das tarefas às estações é efectuada por ordem decrescente do peso posicional de cada tarefa, o qual se define como o somatório dos tempos de processamento dessa tarefa e de todas as outras que se lhe sucedem no diagrama de precedências.

Kilbridge e Wester (1961) propõem uma regra de prioridade baseada no número de tarefas precedentes. De entre as tarefas disponíveis é afectada em primeiro lugar aquela que tem o menor número de tarefas precedentes. Outra heurística muito conhecida é apresentada por Moodie e Young (1965) e considera a afectação de tarefas a estações por ordem decrescente dos tempos de processamento.

Arcus (1966) apresenta um procedimento inovador denominado COMSOAL que aplica uma combinação de várias regras de prioridade para construir um conjunto de soluções de balanceamento do qual é seleccionada a melhor. Toda a apresentação do procedimento tem por base o problema de balanceamento na sua forma mais simples, no entanto, modificando os critérios utilizados para construir a lista de tarefas disponíveis para afectação, é possível contemplar problemas mais complexos que incluam características especiais como, por exemplo, tarefas com tempos de processamento superiores ao tempo de ciclo, restrições de afectação, linhas de modelo-misto e tempos de processamento estocásticos.

Scholl (1999) apresenta uma lista exaustiva das regras de prioridade. Ponnambalam et al (1999) comparam o comportamento de seis heurísticas que utilizam diferentes regras de prioridade, tendo por base um conjunto de medidas de desempenho, nomeadamente, número de postos de trabalho, eficiência da linha, equilíbrio da carga entre os postos de trabalho e tempo de execução da heurística.

As regras de prioridades atrás referidas são designadas por regras estáticas, pois os respectivos parâmetros apenas são calculados uma vez, no início do procedimento. Scholl e Voß (1996) introduzem o conceito de regra de prioridade dinâmica onde, no fim de cada iteração, que corresponde à afectação de uma tarefa a uma estação, os parâmetros são recalculados. Pela regra desenvolvida por estes autores, as tarefas são afectadas por ordem decrescente de um parâmetro que inclui o número de tarefas

disponíveis, no diagrama de precedências e no diagrama de precedências invertido, após cada iteração.

Os métodos de enumeração incompleta são também bastante utilizados para a resolução do problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples. Estes métodos baseiam-se em esquemas de enumeração exactos (como o “branch-and-bound”), os quais são modificados através de restrições heurísticas do espaço de pesquisa.

Hackman et al (1989) apresentam um algoritmo “branch-and-bound” em que, através de regras heurísticas, são eliminados alguns nós da árvore de pesquisa. Essas regras têm por base o tempo inactivo acumulado em cada nó, correspondendo cada nó a uma afectação possível de tarefas a uma determinada estação. Assim, são seleccionados para continuar a pesquisa aqueles nós que apresentem o menor tempo inactivo acumulado e eliminados os restantes.

Shtub e Dar-El (1990) consideram o objectivo de minimizar o número de componentes manuseados por cada estação, para além do objectivo de minimizar o número de estações. Para resolver este problema apresentam uma heurística que consiste na reestruturação do diagrama de precedências, por forma a que as tarefas presentes em cada linha correspondam à montagem de apenas um componente. São então adicionadas restrições de zona ao problema para forçar a afectação das tarefas de cada linha à mesma estação.

Faaland et al (1992) formulam o problema de balanceamento como um problema do tipo “caminho mais curto”, onde os nós representam subconjuntos de tarefas admissíveis (ou seja, que incluem para cada tarefa todas as tarefas que a precedem) e cada arco representa a afectação de uma tarefa. Em cada iteração, é avaliado o custo de cada um dos nós atingidos e são explorados apenas aqueles que apresentam os custos mais reduzidos.

Sarin et al (1999) desenvolvem um procedimento que compreende as seguintes fases: (i) decomposição do problema em subproblemas mais pequenos com um menor número de relações de precedência entre as tarefas, (ii) geração de uma solução inicial para cada subproblema através de um procedimento de programação dinâmica truncado, (iii) melhoramento da solução inicial de cada subproblema utilizando um algoritmo “branch-and-bound” com regras heurísticas para limitar o

processo de enumeração e, finalmente, (iv) geração da solução final juntando as melhores soluções encontradas para os vários subproblemas. Os problemas considerados apresentam tarefas com tempos de processamento estocásticos e não são permitidos postos paralelos nem qualquer tipo de restrições de afectação.

Apesar do elevado número de procedimentos que, ao longo de cinco décadas de investigação, foram desenvolvidos para resolver o PBLMS-I, é reduzido o número dos que incluem características especiais do problema, como a formação de postos paralelos e a existência de restrições de afectação relacionadas com as tarefas, postos de trabalho ou operadores. O método COMSOAL é um dos poucos que contemplam a possibilidade de resolver problemas generalizados.

3.2.2.2 Métodos de melhoramento

Uma desvantagem da utilização de métodos construtivos, como os descritos no ponto anterior, é a impossibilidade de o agente de decisão analisar diferentes soluções alternativas, já que durante o procedimento apenas é construída uma solução. Assim, os métodos de melhoramento terão, em princípio, maiores potencialidades na resolução de problemas de balanceamento mais complexos, uma vez que avaliam um grande número de soluções antes de apresentarem a solução final, podendo o decisor comparar várias soluções alternativas.

Um tipo de heurísticas de melhoramento que tem provado ser adequado na pesquisa de soluções para problemas de optimização combinatória são as designadas meta-heurísticas (Pirlot, 1996). Estes procedimentos distinguem-se dos métodos de pesquisa local pois permitem a deterioração da função objectivo, por forma a ser ultrapassado o problema da optimalidade local. As meta-heurísticas mais conhecidas são a recristalização simulada (“simulated annealing”, Kirkpatrick et al, 1983), a pesquisa tabu (Glover, 1989, 1990) e os algoritmos genéticos (Michalewicz (1996) e Dimopoulos e Zalzala (2000)).

Os algoritmos genéticos têm sido a meta-heurística mais utilizada para abordar o problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples. Anderson e Ferris (1994) revêem a aplicação dos algoritmos genéticos ao PBLMS-I. No entanto, nos diversos artigos analisados, verifica-se que os autores dão mais ênfase ao aperfeiçoamento dos parâmetros e operadores utilizados nos algoritmos do que à resolução de problemas de balanceamento mais complexos.

Sabuncuoglu et al (2000) apresentam um procedimento baseado nos algoritmos genéticos que inclui novos conceitos na área da inteligência artificial, bem como alguns conceitos de recristalização simulada, no entanto a sua implementação é feita apenas em problemas de balanceamento na sua versão mais simples.

Leu et al (1994) propõem um algoritmo genético para resolver o PBLMS-I com restrições de zona. Kim et al (2000) abordam o problema de balanceamento de uma linha de montagem que opera em ambos os lados tendo, por isso, que ser consideradas restrições de afectação relacionadas com a posição dos produtos relativamente a cada lado da linha. Os restantes procedimentos não contemplam qualquer tipo de restrição de afectação nem a existência de postos paralelos.

Suresh e Sahu (1994) propõem um algoritmo de recristalização simulada que considera as tarefas com tempos de processamento estocásticos, mas não permite a inclusão de restrições de zona nem a replicação de estações. A solução inicial é construída utilizando uma heurística que afecta as tarefas aos postos de trabalho, segundo a sua numeração no diagrama de precedências, e as soluções vizinhas são obtidas através de trocas ou transferências de tarefas entre estações.

Também os procedimentos que utilizam a pesquisa tabu consideram apenas a versão mais simples do problema de balanceamento, com excepção do procedimento proposto por Pastor e Corominas (1999), que permite incluir restrições de zona. A heurística desenvolvida por estes autores está dividida em duas fases. Na primeira fase é determinada a solução inicial através de um procedimento de programação dinâmica truncado e, na segunda fase, é feito o melhoramento da solução inicial através de pesquisa local, em que a vizinhança é obtida a partir de transferência de tarefas, e pesquisa tabu, em que a vizinhança é obtida a partir de trocas de pares de tarefas, sendo possível considerar soluções inadmissíveis no que diz respeito à capacidade das estações.

O procedimento de pesquisa tabu de Petersen (1993) minimiza o número de estações e equilibra as cargas de trabalho, considerando a troca de duas tarefas como o movimento que origina uma solução vizinha.

Chiang (1998) apresenta, também, um procedimento de pesquisa tabu para a versão mais simples do problema de balanceamento do tipo I, em que se pretende

minimizar o tempo inactivo e as soluções vizinhas são obtidas a partir de trocas e transferências de tarefas entre estações.

Scholl e Voß (1996) utilizam a relação de dualidade existente entre os problemas do tipo I e do tipo II e aplicam iterativamente um procedimento de pesquisa tabu desenvolvido para a resolução do PBLMS-II por forma a resolver o PBLMS-I.

3.2.3 Métodos de simulação e de apoio à decisão

A utilização de modelos de simulação tem como principal objectivo a análise do comportamento da linha de montagem quando se introduz variabilidade nos tempos de processamento das tarefas. Lyu (1997) apresenta um modelo de simulação para resolver o problema de balanceamento com tempos de processamento estocásticos. O modelo de simulação avalia o desempenho de soluções de balanceamento sucessivas e vai modificando o valor dos parâmetros utilizados no modelo, até o critério de paragem ser verificado.

Os sistemas de apoio à decisão para o balanceamento de linhas de montagem são raramente referidos na literatura relevante, sendo no entanto muito comum a sua utilização em ambiente industrial. Estes sistemas desenvolvidos pelos agentes de decisão utilizam normalmente procedimentos para a construção de soluções de balanceamento muito primários e empíricos, o que indicia um desfasamento entre a investigação realizada nesta área e as necessidades dos utilizadores.

Bartholdi (1993) apresenta um procedimento interactivo e flexível para balancear uma linha de montagem que opera nos dois lados. É utilizada uma heurística simples, que afecta as tarefas arbitrariamente, podendo o utilizador alterar as soluções apresentadas.

O sistema proposto por Oh (1997) tem um módulo interactivo onde são geradas diferentes soluções de balanceamento, e calculadas as respectivas medidas de desempenho, das quais o utilizador selecciona aquela que, para ele, apresenta os valores mais significativos.

Zhao e Souza (2000) apresentam um sistema que combina a simulação visual interactiva e os algoritmos genéticos para a determinação da melhor solução de balanceamento de uma linha de produção automatizada. Várias características dinâmicas da linha são incorporadas no modelo para torná-lo mais realista. O sistema

foi implementado numa indústria de produção de componentes electrónicos e é, segundo os autores, uma ferramenta importante no apoio à decisão dos gestores da linha de produção.

Outros modelos de simulação e sistemas de apoio à decisão que permitem a resolução de problemas de balanceamento de linhas de montagem, tanto de modelo-simples, como de modelo-misto, são apresentados mais à frente na secção 3.3.3.

3.3 Abordagens utilizadas no balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto

3.3.1 Métodos optimizantes

Dada a elevada complexidade do problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto (PBLMM), apenas um número limitado de métodos optimizantes para a sua resolução foram desenvolvidos. Uma revisão dos principais métodos pode ser encontrada em Erel e Sarin (1998).

Recentemente, apenas Göcken e Erel (1997, 1998) e Erel e Göcken (1999) apresentam métodos de optimização para o PBLMM. A abordagem utilizada combina os diagramas de precedência dos diferentes modelos num único diagrama e considera, para o balanceamento da linha de modelo-misto, os tempos de ciclo e os tempos de processamento das tarefas para cada modelo. A utilização de postos paralelos não é prevista.

No primeiro trabalho (Göcken e Erel, 1997), os autores apresentam um modelo de programação por objectivos em que a melhor solução corresponde a um compromisso entre três objectivos diferentes: (i) a minimização do número de estações, (ii) a minimização do tempo de ciclo e (iii) a satisfação das restrições de zona.

No segundo trabalho (Göcken e Erel, 1998), é proposto um modelo de programação binária que minimiza o número de estações, dado o tempo de ciclo de cada modelo, e em que não são consideradas restrições de zona. O modelo apenas permite resolver, em tempo útil, problemas com diagramas combinados até 40 tarefas.

Finalmente, no terceiro trabalho (Erel e Göcken, 1999), é apresentada uma formulação para o PBLMM do tipo “caminho mais curto”, em que cada nó corresponde a um estado, o qual representa um conjunto de tarefas que não requerem a execução de outras tarefas do diagrama de precedências combinado para serem processadas. O primeiro e o último estados correspondem ao conjunto vazio e ao conjunto de todas as tarefas do diagrama, respectivamente. A solução ótima é obtida percorrendo o caminho entre o primeiro e o último estado, com o menor número de arcos, que corresponde à solução com o menor tempo inactivo para todos os modelos. Podem ser adicionadas restrições que contribuem para um melhor equilíbrio das cargas dos modelos entre as estações. Não é relatada qualquer experiência computacional que permita avaliar a dimensão máxima dos problemas que podem ser resolvidos utilizando este método.

A extensão do método SALOME às linhas de modelo-misto é sugerida por Scholl (1999), no entanto não existe nenhuma referência a qualquer trabalho realizado nesse sentido.

Se, para o problema de modelo-simples, a utilização de métodos exactos apenas é possível para problemas de pequena dimensão, nos caso dos problemas de modelo-misto esse facto é acentuado, já que o número de variáveis e de restrições nos modelos de optimização é muito maior, tornando essencial o desenvolvimento de métodos heurísticos para a resolução aproximada do PBLMM-I.

3.3.2 Métodos heurísticos

O número de métodos heurísticos apresentados na literatura relevante para a resolução do problema de balanceamento de linhas de modelo-misto é reduzido, em particular quando comparado com o número de trabalhos publicados para a resolução do mesmo problema em linhas de modelo-simples.

Na maioria dos procedimentos desenvolvidos para a resolução do PBLMM-I, este problema é transformado num problema do tipo PBLMS-I, através da combinação dos diagramas de precedência e dos tempos de processamento dos vários modelos (Fokkert e Kok, 1997).

3.3.2.1 Métodos construtivos

Chakravarty e Shtub (1986) apresentam dois procedimentos para o balanceamento de linhas de modelo-misto, com o objectivo de minimizar os custos globais, que incluem os custos de mão-de-obra, os custos das existências em curso de fabrico e os custos de “set-up” resultantes da mudança dos modelos na linha. O primeiro procedimento faz a afectação das tarefas às estações segundo uma regra de prioridade baseada nos custos que resultam dessa afectação. O segundo procedimento é do tipo “caminho mais curto” em que o comprimento de cada arco corresponde aos custos totais a minimizar.

McMullen e Frazier (1997) propõem uma heurística que considera tempos de processamento estocásticos. O problema de modelo-misto é transformado num problema de modelo-simples, combinando os diagramas de precedências dos diferentes modelos num único diagrama e considerando os tempos médios de processamento de cada tarefa. A afectação das tarefas é feita segundo um conjunto de regras de prioridade e, mesmo que os tempos de processamento das tarefas não excedam o tempo de ciclo, é permitida a formação de postos de trabalho paralelos, enquanto a taxa de utilização da estação aumentar.

Uma heurística proposta por Askin e Zhou (1997) afecta as tarefas aos postos de trabalho por ordem decrescente do peso posicional e permite a formação de postos paralelos em estações que executem tarefas com tempos de processamento superiores ao tempo de ciclo e, também, nos casos em que os custos adicionais resultantes da formação de um posto paralelo sejam inferiores aos custos de inactividade da estação.

3.3.2.2 Métodos de melhoramento

Na maioria dos métodos de melhoramento é considerado, para além da minimização do número de estações, o objectivo de equilibrar as cargas de trabalho dos vários modelos, uma vez que os tempos de processamento das tarefas podem variar de modelo para modelo.

McMullen e Frazier (1998a) apresentam uma heurística baseada no algoritmo de recristalização simulada que considera critérios multiobjectivo para a avaliação das soluções. A solução inicial é obtida aplicando a heurística apresentada em McMullen

e Frazier (1997) e as soluções vizinhas obtêm-se a partir de movimentos de (i) troca de posição entre a tarefa final de uma estação e a tarefa inicial da estação seguinte e (ii) transferência da última tarefa de uma estação para a estação seguinte. Na formação de soluções vizinhas não existe limite no número de postos paralelos permitidos por estação.

Merengo et al (1999) apresentam um procedimento cujo principal objectivo é o de equilibrar as cargas de trabalho a nível horizontal (dentro de cada estação para os vários modelos) e a nível vertical (entre as várias estações), e que consiste em (i) gerar uma solução inicial com um bom equilíbrio horizontal, (ii) tentar melhorar o número de estações da solução inicial, sem piorar o equilíbrio horizontal, e (iii) tentar melhorar o equilíbrio vertical da solução anterior, sem aumentar o número de estações nem piorar o equilíbrio horizontal. Diferentes versões da heurística consideram os tempos de processamento das tarefas para cada modelo e os tempos médios de processamento de cada tarefa. Em nenhuma destas versões se prevê a formação de postos paralelos ou a inclusão de restrições de zona.

O equilíbrio das cargas de trabalho é também o principal objectivo da heurística proposta por Matanachai e Yano (2001), onde o número de estações e o tempo de ciclo são dados. É construída uma árvore de pesquisa em que cada nó corresponde ao conjunto de tarefas afectadas a uma estação. São gerados os nós correspondentes a afectações possíveis para a primeira estação e é apenas explorado aquele com o melhor valor do equilíbrio das cargas de trabalho. O procedimento continua até todas as estações estarem completas. Na tentativa de melhorar o valor da função objectivo da solução resultante são realizadas transferências de tarefas entre as estações. São considerados os tempos de processamentos médios das tarefas e os autores não contemplam a formação de postos paralelos nem a inclusão de restrições de zona.

Curiosamente, o número de meta-heurísticas utilizadas para a resolução do PBLMM-I é muito reduzido. Na literatura analisada, apenas se encontrou o procedimento baseado no algoritmo de recristalização simulada de McMullen e Frazier (1998a). Este aspecto reforça a ideia de que existe um desfasamento entre a aplicação prática das técnicas analisadas e a produção de procedimentos teóricos. A evolução das heurísticas tem sido ditada mais pelo aperfeiçoamento das técnicas e dos procedimentos utilizados, para o que a versão mais simples do problema de

balanceamento é perfeitamente adequada, do que por questões de aplicação prática que obrigam à resolução de problemas de balanceamento mais complexos.

3.3.3 Métodos de simulação e de apoio à decisão

Driscoll e Abdel-Shafi (1985) apresentam um sistema de apoio à decisão que realiza o balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples e modelo-misto, utilizando a heurística do peso posicional e considerando a variabilidade dos tempos de processamento. Através de um modelo de simulação, o sistema avalia o impacto, nas soluções de balanceamento encontradas, da variação de alguns factores como (i) a velocidade da linha, (ii) a possibilidade de os operadores se deslocarem para estações adjacentes, e (iii) o mix de produção.

McMullen e Frazier (1998b) utilizam a simulação para analisar algumas medidas de desempenho da linha de montagem, nomeadamente (i) o nível médio de existências em curso de fabrico, (ii) o tempo médio de fluxo, (iii) o número de unidades produzidas, (iv) o custo médio unitário da mão-de-obra, (v) a utilização do sistema e (vi) os tempos de ciclo obtidos. Os problemas analisados contemplam o balanceamento de linhas de modelo-simples e de modelo-misto, com tempos de processamento estocásticos e com a possibilidade de formação de postos paralelos tal como é descrita em McMullen e Frazier (1997). São testadas 23 heurísticas para a obtenção das soluções de balanceamento e, através dos resultados da simulação, é possível identificar aquelas que melhor se adequam ao sistema em questão.

Roy e Allchurch (1996) desenvolvem um sistema de apoio à decisão, aplicado a um caso da indústria automóvel, que incorpora o conhecimento utilizado pelo agente de decisão no balanceamento das linhas de montagem. O procedimento de balanceamento consiste em (i) dividir as tarefas em várias categorias, segundo a sua importância para a estrutura do balanceamento e considerando restrições de zona de incompatibilidade, (ii) afectar as tarefas em grupos ao longo da linha, e (iii) melhorar o balanceamento da linha ao nível da utilização dos operadores, através de trocas e transferências de tarefas.

O desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão para o balanceamento de linhas de montagem é uma área ainda pouco explorada na investigação, no entanto, para responder às necessidades da realidade industrial é fundamental apostar na sua exploração.

As implantações fabris com sistemas de produção organizados por linhas de montagem deparam-se periodicamente com a necessidade de balancear as linhas, por exemplo, quando ocorrem alterações na procura, nos produtos ou na capacidade. Este facto aconselha a utilização de um suporte informático para a resolução recorrente do problema de balanceamento.

No entanto, um sistema que apenas forneça soluções automáticas para o problema pode não ser o mais adequado, uma vez que, por mais sofisticados que sejam os modelos utilizados para a resolução do problema, existem quase sempre factores imprevisíveis (por exemplo, a ausência de determinado operador, a avaria súbita de um equipamento, etc.) que não são incluídos. Esses factores são do pleno conhecimento do utilizador do sistema e de forma alguma devem ser ignorados. Por esse motivo, o sistema deve permitir ao utilizador incorporar o seu conhecimento e experiência na criação de soluções alternativas e apoiá-lo na decisão, fornecendo-lhe instrumentos para avaliação, validação e melhoria das soluções.

Modelos para o balanceamento de linhas de montagem

Conteúdo

- **Introdução**
- **A utilização de postos paralelos em linhas de montagem**
- **Balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples**
- **Balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto**

4.1 Introdução

Neste capítulo, descrevem-se os modelos de programação matemática e as heurísticas desenvolvidas para o problema de balanceamento de linhas de montagem com postos paralelos e restrições de zona. Algumas considerações de carácter estratégico, relacionadas com a introdução de postos paralelos em linhas de montagem, são tecidas inicialmente, com o objectivo de justificar a inclusão de um aspecto inovador nos modelos desenvolvidos – o controlo do processo de “paralelização” com base nos tempos de processamento das tarefas. O modelo de programação matemática apresentado em primeiro lugar apenas contempla o problema de balanceamento de linhas de montagem com postos paralelos e restrições de zona para linhas de modelo-simples. Uma extensão a este modelo, que o torna aplicável a linhas de modelo-misto, é apresentada posteriormente. A complexidade de ambos os modelos não permite a utilização de métodos optimizantes na sua resolução, mesmo para problemas de dimensão relativamente reduzida. Assim, para cada um daqueles tipos de linha, desenvolveu-se uma heurística, baseada no algoritmo de recristalização simulada, que permite a obtenção de soluções de elevada qualidade com um esforço computacional aceitável. Cada uma destas heurísticas é apresentada na sequência da descrição do modelo correspondente, conjuntamente com os resultados da experiência computacional levada a cabo.

4.2 A utilização de postos paralelos em linhas de montagem

É relativamente comum que a procura de um determinado produto obrigue a operar a linha, utilizada na sua montagem, com um tempo de ciclo inferior ao tempo de processamento da(s) tarefa(s) mais longa(s). Nestes casos é necessário replicar os postos de trabalho onde essas tarefas são efectuadas, por forma a garantir que o quociente entre o tempo de processamento de cada uma dessas tarefas e o número de réplicas dos postos de trabalho onde elas são efectuadas seja inferior ao tempo de ciclo.

A utilização de postos de trabalho paralelos deve, normalmente, ser limitada aos casos em que um pequeno conjunto de tarefas tem tempos de processamento significativamente mais longos do que as restantes. Isto, porque o número de tarefas

que cada operador tem que efectuar aumenta com a replicação dos postos de trabalho – no caso limite, pode-se ter uma única estação com tantos postos paralelos quantos os necessários para satisfazer a procura, realizando cada operador todas as tarefas necessárias à montagem do produto.

Assim, a utilização indiscriminada de postos paralelos vai contra a maior das vantagens da utilização das linhas de montagem – a divisão do trabalho em pequenas tarefas que possam ser realizadas por operadores com baixos níveis de qualificação e que podem ser facilmente formados na execução dessas tarefas.

É, então, necessário controlar o processo de “paralelização”. A utilização de postos de trabalho paralelos deve ter como objectivo adaptar as tarefas com maiores tempos de processamento ao tempo de ciclo especificado e não deve retirar ao sistema os benefícios da produção em linha.

Além de permitir a fidelidade aos princípios que regem a produção em linha, a limitação do número de postos paralelos torna-se uma necessidade quando a implantação fabril se depara com certo tipo de restrições:

- (i) económicas – não existem recursos financeiros disponíveis para a compra de equipamento ou a contratação de mão-de-obra adicional;
- (ii) de espaço – as instalações não comportam a existência de mais unidades de equipamento;
- (iii) de qualificação – existe a necessidade de um maior número de operadores especializados nas tarefas multiplicadas e a sua formação pode não ser viável.

A maioria dos modelos propostos para a resolução do problema do balanceamento de linhas de montagem com postos paralelos (por exemplo, Pinto et al (1975, 1981), Bard (1989), Daganzo e Blumenfeld (1994) e Askin e Zhou (1997)) não limitam o processo de “paralelização” e permitem a replicação de postos de trabalho mesmo quando todas as tarefas têm tempos de processamento inferiores ao tempo de ciclo. A decisão de utilizar postos paralelos é apenas baseada na comparação dos custos de aquisição e instalação de novos equipamentos para os postos paralelos com os custos de contratar mão-de-obra adicional para a linha original, por forma a satisfazer a procura.

McMullen e Frazier (1997, 1998a) baseiam-se na percentagem de utilização das estações para a determinação do número de postos paralelos em cada estação.

Schofield (1979) e Sarker e Shantikumar (1983) abordam o controlo do processo de “paralelização” definindo um limite para o número de postos paralelos, enquanto Buxey (1974) inclui um limite ao número de tarefas por posto de trabalho.

Os modelos propostos neste trabalho contemplam o controlo do processo de “paralelização” de uma forma interactiva e inovadora. O utilizador (o gestor da linha de montagem) pode definir, além do número máximo de réplicas em cada estação, um limite mínimo para o tempo de processamento de uma tarefa que permite a replicação do posto de trabalho em que essa tarefa é efectuada. Este limite é definido como uma proporção do tempo de ciclo e, por defeito, é 100%, o que significa que apenas os postos de trabalho onde são efectuadas tarefas com um tempo de processamento superior ao tempo de ciclo podem ser replicadas.

4.3 Balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples

4.3.1 Modelo de programação matemática

O modelo proposto para o balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples com postos paralelos e restrições de zona assenta nos seguintes pressupostos:

- (i) um único produto é montado na linha de montagem e a sua procura é estável ao longo do tempo;
- (ii) o processamento do produto é efectuado de acordo com um processo de montagem pré-estabelecido, no qual os seguintes aspectos são definidos:
 - o tempo necessário para processar cada uma das N tarefas requeridas para a montagem do produto, t_i ($i=1, \dots, N$);
 - as restrições de precedência, isto é, o conjunto de tarefas que não podem ser processadas antes da tarefa i estar concluída, F_i (tarefas sucessoras de i);
 - as restrições de zona, ou seja, os conjuntos ZP de pares de tarefas que têm que ser afectadas à mesma estação (tarefas compatíveis) e ZN de pares de tarefas que não podem ser afectadas à mesma estação (tarefas incompatíveis);
- (iii) para o horizonte de planeamento definido, o nível de procura requer que a linha seja operada com um tempo de ciclo C ;

- (iv) as tarefas ($i=1, \dots, N$) são processadas num conjunto de estações de trabalho ($k=1, \dots, S$);
- (v) uma tarefa sucessora da tarefa i não pode ser afectada a uma estação antes desta última ser afectada;
- (vi) uma tarefa só pode ser afectada a uma única estação;
- (vii) uma estação pode ser replicada ou “paralelizada” até um máximo de MAXP réplicas, mas apenas se o tempo de processamento de uma das tarefas afectadas a essa estação exceder um valor pré-definido ($\alpha\%$ do tempo de ciclo).

As variáveis de decisão são definidas da seguinte forma:

- $x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa } i \text{ é afectada à estação } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $r_k = \begin{cases} 1, & \text{se a estação } k \text{ pode ser replicada} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- s_k – tempo inactivo da estação k .

O problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples com postos paralelos e restrições de zona pode ser formulado como um problema de programação matemática, conforme se apresenta na figura 4.1. Este modelo minimiza o número de estações de trabalho para um dado tempo de ciclo e, simultaneamente, equilibra as cargas de trabalho entre as diversas estações.

O primeiro termo da função objectivo (1) minimiza o índice da estação a que está afectada a última tarefa, minimizando, assim, o número total de estações.

O segundo termo equilibra a carga de trabalho entre as diferentes estações, onde S' é o número total de postos de trabalho (incluindo os postos paralelos) utilizado para satisfazer a procura na linha de montagem e TI é o tempo inactivo da linha

($TI = \sum_{k=1}^S s_k$). Este termo varia entre zero, quando TI está igualmente distribuído por todas as estações da linha, e um, quando TI é igual ao tempo inactivo de uma das estações.

Assim, a melhor solução é aquela que tem o menor número de estações e que, para esse número de estações, apresenta um melhor equilíbrio das cargas de trabalho.

Min	$\sum_{k=1}^S k \cdot x_{Nk} + \frac{S'}{S'-1} \sum_{k=1}^S \left(\frac{s_k}{TI} - \frac{1}{S'} \right)^2$	(1)
s. a	$\sum_{k=1}^S x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, N$	(2)
	$\sum_{k=1}^S k \cdot x_{ak} - \sum_{k=1}^S k \cdot x_{kb} \leq 0 \quad a \in N; b \in F_a$	(3)
	$\sum_{k=1}^S k \cdot x_{ak} - \sum_{k=1}^S k \cdot x_{kb} = 0 \quad (a, b) \in ZP$	(4)
	$x_{ak} + x_{bk} \leq 1 \quad (a, b) \in ZN; k = 1, \dots, S$	(5)
	$\sum_{i=1}^N t_i \cdot x_{ik} + s_k = C[1 + r_k (MAXP - 1)] \quad k = 1, \dots, S$	(6a)
	$r_k \leq \sum_{i: t_i > \alpha \cdot C} x_{ik} \quad k = 1, \dots, S; 0 \leq \alpha \leq 1$	(6b)
	$\mathcal{M} \cdot r_k \geq \sum_{i: t_i \geq \alpha \cdot C} x_{ik} \quad k = 1, \dots, S; 0 \leq \alpha \leq 1$	(6c)
	$s_k \geq 0 \quad k = 1, \dots, S$	(7a)
	$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad k = 1, \dots, S; i = 1, \dots, N$	(7b)
	$r_k \in \{0, 1\} \quad k = 1, \dots, S$	(7c)

Figura 4.1 – Modelo de programação matemática para o PBLMS-I com postos paralelos e restrições de zona

As restrições do modelo podem ser interpretadas da forma seguinte:

- (2) restrições que garantem que uma tarefa é afectada apenas a uma estação;
- (3) restrições que impedem que uma tarefa sucessora da tarefa i seja afectada a uma estação anterior àquela em que i vai ser realizada;
- (4) restrições de zona de compatibilidade;
- (5) restrições de zona de incompatibilidade;
- (6) conjunto de restrições que garantem que: (i) a capacidade de cada estação não é excedida, (ii) o número máximo de postos paralelos que uma estação pode ter não é excedido e (iii) apenas as estações às quais estão afectadas tarefas com tempos de processamento que excedem uma certa proporção ($\alpha\%$) do tempo de ciclo podem ser replicadas;
- (7) conjunto de restrições que definem o domínio das variáveis de decisão.

O elevado número de restrições e de variáveis binárias do modelo proposto torna impossível a resolução de problemas do mundo real através de métodos optimizantes. Apesar do número de variáveis poder ser reduzido, restringindo, para cada tarefa, o número de estações possíveis para afectação (ver, por exemplo, Scholl, 1999), o problema resultante permaneceria, ainda assim, demasiado complexo para

ser resolvido de forma exacta. Por esse motivo, foi desenvolvida uma heurística baseada no algoritmo de recristalização simulada para abordar o problema.

4.3.2 Algoritmo geral de recristalização simulada

O algoritmo de recristalização simulada foi proposto por Kirkpatrick et al (1983), para a resolução aproximada de problemas de optimização combinatória.

A sua designação advém da analogia com um processo da mecânica estatística em que se procura colocar um sistema físico no seu estado de energia mais baixo através de um arrefecimento controlado.

O processo de recristalização tem como principais características:

- (i) uma função custo (f), que associa um custo a cada estado do sistema;
- (ii) uma temperatura (T), que diminui gradualmente ao longo do processo;
- (iii) um procedimento para alterar o estado do sistema, formando soluções vizinhas.

O funcionamento do algoritmo de recristalização simulada consiste em, iterativamente, propor alterações ao estado do sistema, formando soluções vizinhas, e, de seguida, aceitar ou rejeitar essas soluções. A aceitação ou rejeição de uma solução vizinha depende (i) da temperatura do sistema e (ii) da variação da função custo (Δ).

Se a função custo diminui, então a solução vizinha é aceite incondicionalmente, caso contrário, a solução é aceite com uma probabilidade $p=e^{-\Delta/T}$.

Verifica-se que, quando a temperatura é muito elevada, todas as soluções vizinhas são aceites, tornando-se a pesquisa totalmente aleatória, já que não tem em conta o valor da função custo. Pelo contrário, quando a temperatura é muito reduzida (tomando o valor zero no caso extremo), apenas são aceites as alterações ao estado do sistema que diminuem a função custo, o que leva a que o algoritmo termine em estados correspondentes a óptimos locais.

Assim, para evitar o problema da optimalidade local, o algoritmo de recristalização simulada realiza o procedimento de aceitação e rejeição de soluções vizinhas, descrito anteriormente, entre extremos de temperatura.

O sistema é colocado inicialmente a um nível de temperatura elevado e, de seguida, é arrefecido de uma forma controlada, seguindo uma curva de temperatura do tipo da apresentada na figura 4.2, permanecendo um tempo pré-determinado (L) em cada patamar de temperatura, até ser atingida a temperatura de “cristalização” (T_{final}).

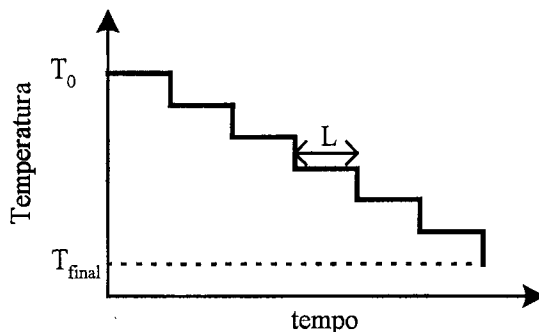


Figura 4.2 – Curva de variação da temperatura para o algoritmo de recristalização simulada

O algoritmo de recristalização simulada tem sido aplicado a inúmeros problemas nas áreas da gestão e organização da produção, entre os quais o problema de balanceamento de linhas de montagem (ver, por exemplo, Suresh e Sahu (1994), Heinrich (1994) e McMullen e Frazier (1998a)). Dado que a qualidade das soluções que se obtém, na generalidade dos casos, quando se utiliza esta meta-heurística é bastante aceitável, e tendo em conta a sua adequação ao problema em estudo, decidiu-se a sua utilização.

O algoritmo geral de recristalização simulada, que se apresenta na figura 4.3, parte de uma temperatura inicial, T_0 , e de uma solução admissível inicial, S_0 , para o problema em causa. Compreende um ciclo interior (controlado pelo parâmetro n , que varia de 1 até ao comprimento do patamar, L) e um ciclo exterior (controlado pelo parâmetro temperatura T , que varia de T_0 até à temperatura de “cristalização”, T_{final}). Em cada iteração do ciclo interior, $n \leq L$, gera-se uma solução vizinha (S_n) da solução corrente (S). Se a diferença entre os valores da função objectivo da solução vizinha ($f(S_n)$) e da solução corrente ($f(S)$) é menor ou igual a zero ($\Delta = f(S_n) - f(S) \leq 0$), a solução vizinha é aceite e substitui a solução corrente ($S = S_n$). No caso contrário, a solução vizinha pode ser aceite como solução corrente com uma probabilidade $p = e^{-\Delta/T}$.

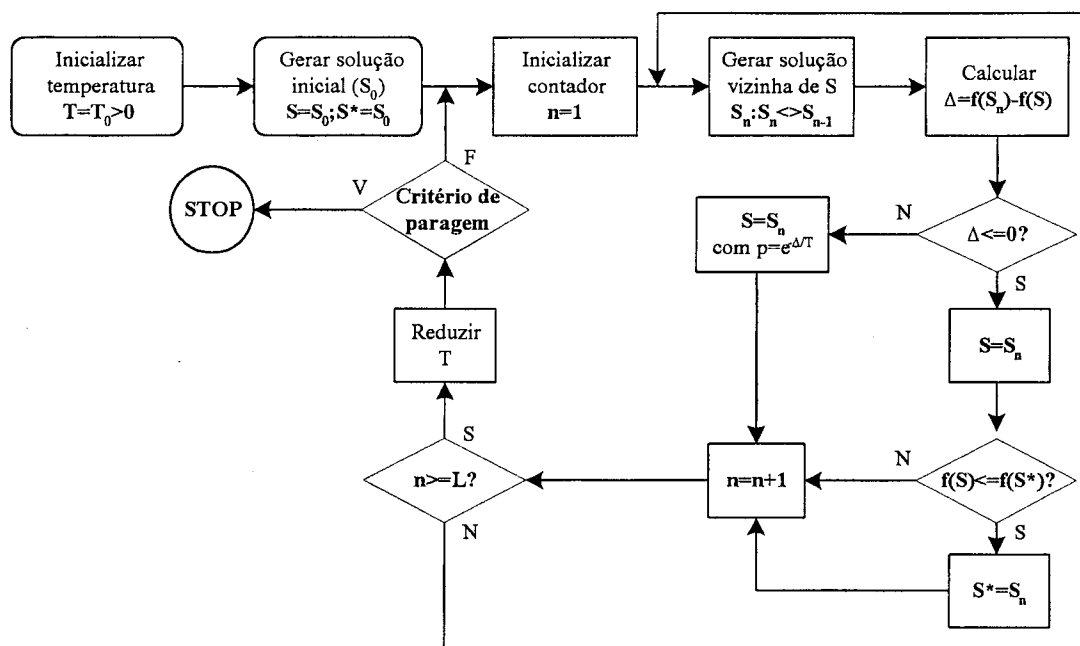


Figura 4.3 – Algoritmo geral de recristalização simulada

O valor do parâmetro T decresce em cada iteração do ciclo exterior, diminuindo, assim, a probabilidade de aceitação de soluções vizinhas inferiores à solução corrente entre cada iteração do ciclo exterior. Obviamente que, além da solução vizinha e da solução corrente, a melhor solução encontrada (S^*) é mantida ao longo da execução do algoritmo. Note-se ainda que em duas iterações consecutivas do ciclo interior as soluções vizinhas têm que ser diferentes ($S_n \neq S_{n-1}$), por forma a garantir a progressão do algoritmo.

O desempenho do algoritmo de recristalização simulada depende essencialmente da selecção dos vários parâmetros de controlo:

- (i) A temperatura inicial, T_0 , deve ser suficientemente elevada por forma a que, na primeira iteração do procedimento, a probabilidade de aceitação de soluções inferiores seja de, pelo menos, 80% (Kirkpatrick et al, 1983). A escolha de valores que conduzam a probabilidades de aceitação muito mais elevadas do que esta podem prejudicar os tempos de execução, sem que tal corresponda a melhorias substanciais no resultado.
- (ii) A função de redução da temperatura mais utilizada é a função geométrica: $T_i = a_i \cdot T_{i-1}$ ($a_i < 1$ constante). Tipicamente, $0.7 \leq a_i \leq 0.95$. Uma vez que a probabilidade de aceitação de soluções é função da temperatura, a escolha de valores baixos de a_i pode conduzir a que o procedimento “cristalize” em

óptimos locais afastados do óptimo global. Por outro lado, a escolha de valores elevados de a_i prejudica os tempos de execução.

- (iii) O comprimento do patamar, L , determina o número de soluções geradas para cada nível de temperatura. Normalmente, o comprimento do patamar é fixo e é uma função da dimensão do problema.
- (iv) O critério de paragem especifica o estado em que se considera o sistema “cristalizado”. De entre os vários critérios de paragem, podem ser destacados aqueles que se baseiam nas seguintes medidas:
 - o número total de soluções candidatas geradas;
 - a temperatura mais baixa que pode ser atingida (temperatura de “cristalização”, T_{final});
 - o valor mínimo da razão entre o número de soluções aceites e o número de soluções geradas;
 - o gradiente mínimo de melhoria da função objectivo para um número pré-fixado de níveis de temperatura.

Outras decisões estrategicamente importantes para a implementação do algoritmo são a geração da solução inicial e a geração das soluções vizinhas.

A heurística proposta para a resolução do problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples com postos paralelos e restrições de zona, baseada no algoritmo de recristalização simulada, é apresentada no ponto seguinte.

4.3.3 Heurística proposta

As principais características incorporadas na heurística proposta para o problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples com postos paralelos e restrições de zona são as seguintes:

- (i) o objectivo é a minimização do número de estações, para um dado tempo de ciclo;
- (ii) o objectivo adicional de equilibrar as cargas de trabalho entre as estações é também considerado;
- (iii) um conjunto de restrições de zona pode ser incluído;
- (iv) o utilizador pode definir um limite máximo para o número de postos paralelos em cada estação (MAXP);

- (v) o utilizador pode definir um limite inferior para o tempo de processamento das tarefas, expresso como uma percentagem do tempo de ciclo ($\alpha\%$), que desencadeie a replicação dos postos de trabalho, aos quais estão afectadas as tarefas cujo tempo de processamento excede αC . Por defeito, o valor de α é de 100%, o que significa que apenas as estações às quais estão afectadas tarefas com tempos de processamento superiores ao tempo de ciclo é que podem ser replicadas.

A heurística está dividida em duas fases, esquematizadas na figura 4.4. Na primeira fase é encontrada uma solução sub-ótima para o objectivo principal do problema. Na segunda fase é considerado o objectivo adicional do equilíbrio das cargas de trabalho entre as estações. Em ambas as fases é aplicado o algoritmo de recristalização simulada.

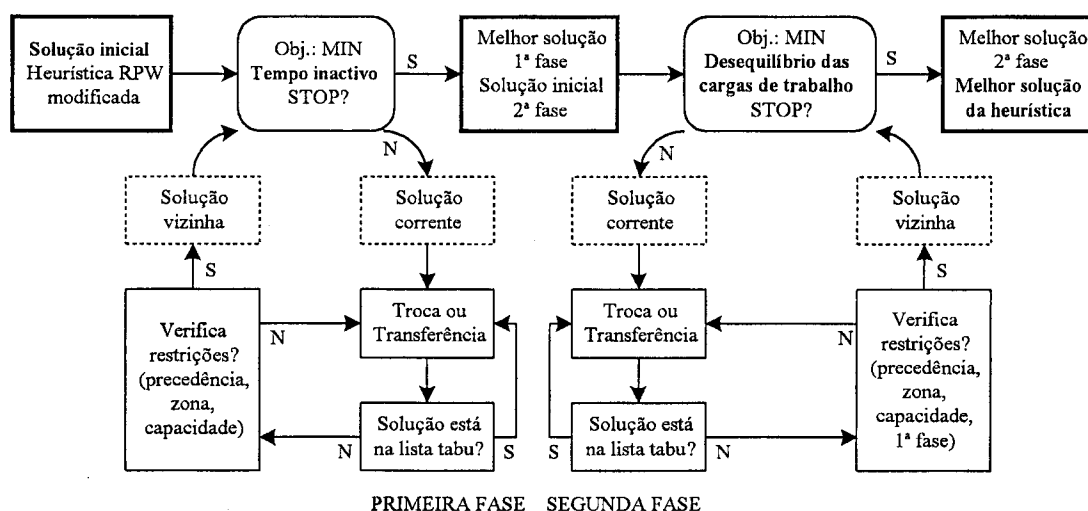


Figura 4.4 – Esquema da heurística proposta para o balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples com postos paralelos e restrições de zona

4.3.3.1 Primeira fase

O objectivo da primeira fase da heurística é a obtenção de um balanceamento da linha que minimize o número de estações, para um determinado tempo de ciclo.

Determinação da solução inicial

A solução inicial é obtida utilizando uma versão da heurística RPW, baseada no peso posicional, proposta por Helgeson e Birnie (1961). O peso posicional de uma tarefa consiste no somatório dos tempos de processamento dessa tarefa e de todos as

suas sucessoras. As tarefas são afectadas à estação admissível de menor índice, por ordem decrescente do seu peso posicional. Na versão original da heurística RPW, a carga de trabalho de cada estação não pode exceder o tempo de ciclo (donde resulta o conceito de estação admissível), não contemplando, por isso, a existência de postos paralelos. A versão da heurística RPW utilizada para obter a solução inicial do procedimento proposto, redefine o conceito de estação admissível do seguinte modo: se uma estação executa uma tarefa com um tempo de processamento superior a αC , a sua capacidade é $C \times \text{MAXP}$, caso contrário é C .

A versão implementada da heurística RPW verifica as restrições de incompatibilidade entre tarefas. Quanto às tarefas que têm obrigatoriamente que ser processadas na mesma estação, o procedimento agrega-as previamente, passando a ser tratadas como uma só.

Definição da função objectivo

A função objectivo utilizada na primeira fase da heurística minimiza o tempo inactivo da linha, o qual corresponde ao somatório dos tempos inactivos de todas as estações na linha de montagem, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$TI = \sum_{k=1}^S s_k = \sum_{k=1}^S (R_k \cdot C - \sum_{i \in O_k} t_i) \quad (8)$$

na qual:

- s_k é o tempo inactivo da estação k ;
- S é o número de estações;
- t_i é o tempo de processamento da tarefa i ;
- O_k é o conjunto de tarefas afectadas à estação k ;
- R_k é o número de réplicas ou de postos paralelos da estação k na linha.

Minimizar o tempo inactivo ou o número de estações da linha de montagem são objectivos equivalentes. A utilização do primeiro daqueles critérios, por substituição do que anteriormente foi definido, no primeiro termo da função objectivo do modelo de programação matemática (apresentado na figura 4.1), deve-se exclusivamente a razões de facilidade de programação.

Soluções vizinhas

Uma solução vizinha pode ser gerada por uma das seguintes acções:

- (i) troca de duas tarefas afectadas a estações diferentes ou
- (ii) transferência de uma tarefa para uma estação diferente daquela em que está a ser processada.

Dado que se pretende minimizar o número de postos de trabalho e que o movimento de transferência é o único que permite a eliminação de estações, este será o tipo de acção preferencial. No entanto, a realização de movimentos de troca é também importante, pois pode facilitar a geração de movimentos de transferência que resultem na eliminação de estações. Assim, são atribuídas, por defeito, probabilidades de 25% e 75% para a realização de movimentos de troca e de transferência, respectivamente, podendo o utilizador modificar estes valores.

Em ambas as fases da heurística utiliza-se uma lista tabu para guardar informação relativa às soluções vizinhas mais recentes, com o objectivo de evitar a entrada em ciclo do procedimento.

Num movimento de troca, seleccionam-se aleatoriamente duas tarefas, processadas em estações diferentes, e trocam-se as suas posições. Num movimento de transferência, seleccionam-se aleatoriamente uma tarefa e uma estação (diferente daquela a que a tarefa está afectada) e transfere-se a tarefa seleccionada para essa estação. Estes movimentos não podem originar soluções presentes na lista tabu e têm que respeitar as restrições de precedência, de zona e de capacidade das estações.

A forma como são tratadas as restrições de precedência na formação das soluções vizinhas é ilustrada através de um exemplo. Considerando a solução de balanceamento esquematizada na figura 4.5, onde são apresentados o diagrama de precedências e a afectação das tarefas às estações, pretende-se obter uma solução vizinha, a partir de um movimento de troca ou de transferência.

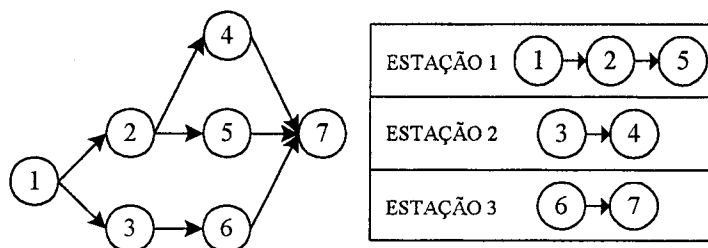


Figura 4.5 – Exemplo de uma solução de balanceamento

Para a realização de um movimento de troca de duas tarefas, A e B, afectadas às estações E(A) e E(B), o procedimento verifica se:

- (i) a tarefa A não é precedente da tarefa B e vice-versa – no exemplo apresentado, não seria possível trocar as tarefas 2 e 4, pois a tarefa 2 é precedente da tarefa 4;
- (ii) as tarefas A e B não são afectadas antes das suas tarefas precedentes – uma troca entre as tarefas 5 e 6 não seria possível, pois a tarefa 6 ficaria afectada antes da tarefa 3 que é sua precedente;
- (iii) as tarefas A e B não são afectadas à frente de tarefas das quais são precedentes – uma troca entre as tarefas 2 e 3 não seria possível, pois a tarefa 2 ficaria afectada após a tarefa 5 da qual é precedente.

Para uma transferência admissível da tarefa A o procedimento verifica se:

- (i) a tarefa A não é afectada antes das suas tarefas precedentes – a transferência da tarefa 7 para a estação 2 não seria admissível, pois a tarefa 6 é sua precedente e permaneceria na estação 3;
- (ii) a tarefa A não é afectada à frente de tarefas das quais é precedente – a transferência da tarefa 2 para a estação 2 não seria admissível, já que a tarefa 2 ficaria afectada após a tarefa 5 da qual é precedente.

Dois movimentos admissíveis seriam, por exemplo, a troca das tarefas 4 e 5, ou a transferência da tarefa 4 para a estação 3, pois todas as restrições de precedência seriam verificadas.

As restrições de incompatibilidade são representadas por uma matriz (tarefas $\times$ tarefas) em que um valor unitário numa das células indica que o par de tarefas correspondentes é incompatível e, por isso, não pode ser afectado à mesma estação. O procedimento verifica se, como resultado de um movimento de troca ou transferência, duas tarefas incompatíveis vão ficar afectadas à mesma estação. Se isso acontecer, esse movimento não será realizado.

Em consequência de um movimento de troca ou de transferência pode resultar que a “paralelização” de uma das estações envolvidas deixe de ser admissível (porque deixou de processar uma tarefa com tempo de processamento superior a αC) e, consequentemente, que haja necessidade de replicar a outra estação envolvida (porque passou a processar uma tarefa com tempo de processamento superior a αC).

Quando tal ocorre, o procedimento actualiza a capacidade das estações e verifica se o limite máximo de réplicas (MAXP) é cumprido.

Se em qualquer uma das situações anteriores o procedimento é conduzido a uma solução não admissível, o processo de obtenção de uma solução vizinha é reiniciado.

4.3.3.2 Segunda fase

O objectivo da segunda fase da heurística é o de equilibrar as cargas de trabalho entre as várias estações, mantendo (ou melhorando) o número de estações obtido na primeira fase. Assim, a solução inicial desta fase é a melhor solução encontrada no final da primeira fase.

O critério utilizado para avaliar as soluções vizinhas corresponde ao segundo termo da função objectivo (1) do modelo matemático apresentado na figura 4.1:

$$E = \frac{S'}{S'-1} \sum_{k=1}^S \left(\frac{s_k}{TI} - \frac{1}{S'} \right)^2 \quad (9)$$

Dado que, em princípio, será pouco provável diminuir o número de estações nesta fase e, como os movimentos de troca são mais adequados para equilibrar as cargas de trabalho entre as estações, são atribuídas, por defeito, as probabilidades de 75% e 25% aos movimentos de troca e de transferência, respectivamente.

A melhor solução apresentada pela heurística é, então, aquela que, não só minimiza o número de estações, como também distribui as cargas de trabalho pelas estações o mais equitativamente possível.

4.3.3.3 Parâmetros de controlo

Para a implementação do algoritmo de recristalização simulada, em ambas as fases da heurística, foram utilizados os seguintes parâmetros de controlo:

- (i) Temperatura inicial (T_0): As experiências computacionais efectuadas mostraram que a diferença dos valores da função objectivo de duas soluções vizinhas nunca excediam 10%. Assim, para uma temperatura inicial de 50 garante-se que a probabilidade de aceitação de uma solução inferior é 80%.
- (ii) Função de redução da temperatura: Foi utilizada uma função geométrica com um factor de redução de temperatura de 0,9 ($T_i = 0,9T_{i-1}$).

- (iii) Comprimento do patamar (L): Um factor dominante no esforço computacional associado à resolução do problema é o número de tarefas (N). Assim, por forma a restringir o esforço computacional à primeira ordem do factor dominante, limitou-se o número de soluções pesquisadas em cada nível de temperatura a $K.N$, onde K é uma constante definida pelo utilizador ($K=1$ é o valor inicialmente sugerido ao utilizador).
- (iv) Critério de paragem: Utilizaram-se dois critérios de paragem. Em primeiro lugar, definiu-se uma temperatura de “cristalização” de 10, o que significa que se utilizaram 16 patamares de temperatura consecutivos ($T_0.a_i^{15}=50.(0,9^{15})=10,29$). Em segundo lugar, admitiu-se que, se em cinco patamares de temperatura se rejeitarem 85% das soluções geradas, então, a probabilidade de substituição da melhor solução encontrada até aí é muito pequena e o algoritmo deve terminar.

4.3.3.4 Exemplo numérico

O funcionamento da heurística proposta é ilustrado com um exemplo numérico, cujo diagrama de precedências é apresentado na figura 4.6, e os respectivos tempos de processamento das tarefas (em unidades de tempo – u.t.) são apresentados na tabela 4.1.

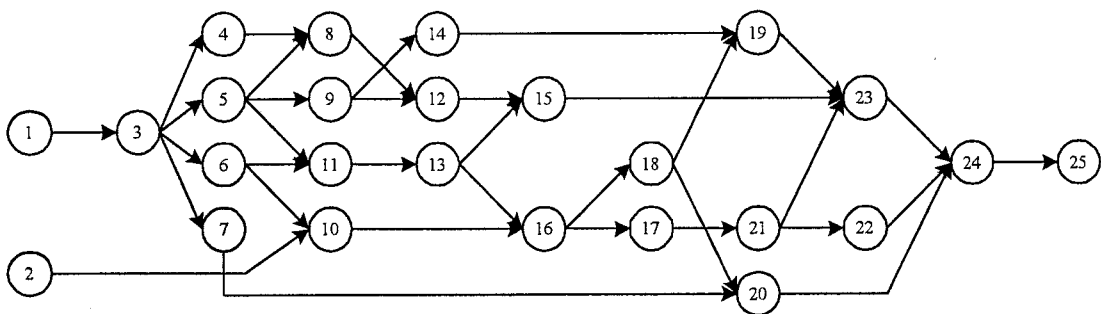


Figura 4.6 – Diagrama de precedências para o exemplo numérico de uma linha de montagem de modelo-simples

Tabela 4.1 – Tempos de processamento das tarefas do exemplo numérico de uma linha de montagem de modelo-simples

Tarefa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Tempo (u.t.)	2	3	7	6	6	8	5	3	3	4	3	2	6	3	7	12	3	4	9	2	10	1	14	1	4

Pretende-se balancear a linha de montagem para um tempo de ciclo de 9 u.t., tendo em conta as seguintes restrições:

- (i) as tarefas 11 e 13 não podem ser executadas na mesma estação;
- (ii) o número máximo de réplicas para cada estação é duas (MAXP=2);
- (iii) apenas as estações que executam tarefas com tempos de processamento superiores ao tempo de ciclo podem ser duplicadas ($\alpha=100\%$).

A solução inicial é determinada pela versão modificada da heurística RPW. Os pesos posicionais das tarefas, em unidades de tempo, são apresentados, por ordem decrescente, na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores dos pesos posicionais para o exemplo numérico de uma linha de modelo-simples

Tarefa	Sucessores	Peso Posicional
1	3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	125
3	4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	123
5	8,9,12,14,15,19,23,24,25	93
6	10,11,13,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	88
11	13,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	76
13	15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	73
2	10,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	67
10	16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	64
16	17,18,19,20,21,22,23,24,25	60
9	14,19,23,24,25	43
4	8,12,15,23,24,25	37
18	19,20,23,24,25	34
17	21,22,24,25	33
8	12,15,23,24,25	31
14	19,23,24,25	31
21	22,24,25	30
12	15,23,24,25	28
19	23,24,25	28
15	23,24,25	26
23	24,25	19
7	20,24,25	12
20	24,25	7
22	24,25	6
24	25	5
25	-	4

A sequência de afectação das tarefas às estações é apresentada na tabela 4.3. A primeira coluna (“Tarefas candidatas”) mostra as tarefas que, em cada iteração, podem ser afectadas, pois satisfazem as restrições de precedência e de zona e ainda

não foram afectadas. A tarefa candidata com o peso posicional mais elevado é seleccionada para afectação (“Tarefa afectada”). A terceira e quarta colunas mostram a estação à qual a tarefa é afectada e o número de réplicas (postos de trabalho) necessários nessa estação. O tempo disponível em cada estação após a afectação é apresentado na quinta coluna.

De notar que, dado que apenas os tempos de processamento das tarefas 16, 21 e 23 excedem o tempo de ciclo, só as estações que as executam é que podem ser replicadas.

Tabela 4.3 – Sequência de afectação das tarefas

Tarefas candidatas	Tarefa afectada	Estação	Número de réplicas	Tempo disponível	Observações
1,2	1	1	1	7	
2,3	3	1	1	0	
2,4,5,6,7	5	2	1	3	
2,4,6,7,9	2	2	1	0	
4,6,7,9	6	3	1	1	(i)
4,7,9,10,11	11	4	1	6	
4,7,9,10,13	13	4	1	0	(ii)
4,7,9,10,13	10	4	1	2	(i)
4,7,9,13,16	13	5	1	3	
4,7,9,16	16	5	2	0	(iii)
4,7,9,17,18	9	6	1	6	
4,7,17,18	4	6	1	0	
7,8,17,18	18	7	1	5	
7,8,17	17	7	1	2	
7,8,21	21	7	2	1	(iii)
7,8,22	22	7	2	0	
7,8	8	8	1	6	
7,12,14	14	8	1	3	
7,12,19	12	8	1	1	(i).
7,15,19	19	9	1	0	
7,15	15	10	1	2	(i)
7,23	23	11	2	4	(iii) (i)
7	7	12	1	4	
20	20	12	1	2	
24	24	12	1	1	(i)
25	25	13	1	5	

Observações:
(i) Todas as tarefas candidatas têm tempos de processamento superiores ao tempo disponível. Fechar estação.
(ii) Devido a restrições de zona a tarefa não pode ser afectada a esta estação.
(iii) A tarefa tem um tempo de processamento superior ao tempo de ciclo. É necessária uma segunda réplica.

Na tabela 4.4 é apresentada a configuração da linha de montagem para a solução inicial. Esta solução apresenta 13 estações (com um total de 16 postos de trabalho), um tempo inactivo da linha de TI=16 u.t. e um valor do equilíbrio entre as cargas de E=0,14.

Após um determinado número de movimentos de troca e transferência, a partir da solução inicial, é formada a solução A cuja configuração é apresentada na tabela 4.5. Esta solução tem um total de 16 postos de trabalho, um tempo inactivo da linha de $TI=16$ u.t, igual ao da solução inicial, e um valor do equilíbrio entre as cargas de $E=0,25$.

Tabela 4.4 – Afecção de tarefas para a solução inicial

Estação	Número de réplicas	Tarefas afectadas	Tempo inactivo
1	1	1,3	0
2	1	2,5	0
3	1	6	1
4	1	10,11	2
5	2	13,16	0
6	1	4,9	0
7	2	17,18,21,22	0
8	1	8,12,14	1
9	1	19	0
10	1	15	2
11	2	23	4
12	1	7,20,24	1
13	1	25	5

$S'=16$; $TI=16$; $E=0,14$

Tabela 4.5 – Afecção de tarefas para a solução A

Estação	Número de réplicas	Tarefas afectadas	Tempo inactivo
1	1	1,3	0
2	1	5,9	0
3	1	6	1
4	1	4,11	0
5	1	2,13	0
6	1	7,10	0
7	2	8,14,16	0
8	2	17,18,21,22	0
9	1	12,15	0
10	1	19	0
11	2	23	4
12	1	20,24	6
13	1	25	5

$S'=16$; $TI=16$; $E=0,25$

Partindo da solução A, a heurística reduz o número de estações, transferindo a tarefa 23 para a estação 12 e, uma vez que são cumpridas as restrições de precedência, de zona e de capacidade, eliminando a estação 11. A solução correspondente (solução B) é representada na tabela 4.6 e apresenta 12 estações (com um total de 15 postos de trabalho), um tempo inactivo da linha de $TI=7$ u.t e um

valor do equilíbrio entre as cargas de $E=0,51$. O elevado valor de E é explicado pelo desequilíbrio da distribuição das cargas de trabalho pelas estações. Note-se que a estação 12 apresenta por si só 71% do valor de TI enquanto que a maioria das restantes estações apresentam um tempo inactivo nulo.

Tabela 4.6 – Afectação de tarefas para a solução B

Estação	Número de réplicas	Tarefas afectadas	Tempo inactivo
1	1	1,3	0
2	1	5,9	0
3	1	6	1
4	1	4,11	0
5	1	2,13	0
6	1	7,10	0
7	2	8,14,16	0
8	2	17,18,21,22	0
9	1	12,15	0
10	1	19	0
11	2	20,23,24	1
12	1	25	5

$S'=15$; $TI=7$; $E=0,51$

A solução B corresponde à melhor solução da primeira fase da heurística e à solução inicial da segunda fase. Na segunda fase, o algoritmo tenta melhorar o valor de E , que traduz o equilíbrio das cargas de trabalho entre as estações, através de movimentos de troca e transferência. A melhor solução encontrada pela heurística é apresentada na tabela 4.7. Esta solução tem 12 estações (com um total de 15 postos de trabalho) e um valor do equilíbrio entre as cargas de $E=0,38$.

Tabela 4.7 – Afectação de tarefas para a melhor solução

Estação	Número de réplicas	Tarefas afectadas	Tempo inactivo
1	1	1,3	0
2	1	5,9	0
3	1	6	1
4	1	4,11	0
5	1	2,13	0
6	1	7,10	0
7	2	8,14,16	0
8	2	17,18,21,22	0
9	1	12,15	0
10	1	19	0
11	2	20,23	2
12	1	24,25	4

$S'=15$; $TI=7$; $E=0,38$

4.3.4 Experiência computacional

A heurística proposta foi implementada em linguagem de programação C e executada num PC com um processador Pentium II a 233 MHz. A avaliação do desempenho da heurística é efectuada nos pontos seguintes.

4.3.4.1 Comparação com problemas referidos na literatura

O objectivo da heurística proposta é a resolução de problemas de balanceamento de linhas de montagem com características especiais como restrições de zona e postos de trabalho paralelos, cuja replicação é controlada através do tempo de processamento das tarefas.

Não foram encontrados na literatura problemas com características idênticas àquelas que foram consideradas para o desenvolvimento da heurística. A maioria dos métodos que contemplam a existência de postos paralelos, utilizam uma função objectivo que tem por base uma comparação de custos, para determinar o número de postos paralelos, sendo a filosofia de abordagem ao problema totalmente diferente da heurística desenvolvida. Assim, para ser possível a comparação com outros métodos, a heurística foi adaptada e testada em alguns problemas extraídos da literatura.

Em primeiro lugar foram testados problemas de balanceamento simples, ou seja, sem restrições de zona nem postos paralelos ($MAXP=1$). Para este tipo de problemas existem métodos exactos de resolução e são conhecidas soluções óptimas, o que serve de referência para analisar o desempenho da heurística proposta.

O primeiro problema testado tem 70 tarefas e foi executado para diferentes tempos de ciclo (C). Para cada tempo de ciclo, correu-se a heurística dez vezes. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.8, onde S^* é a solução óptima (ver Baybars, 1986b), SH representa o número de estações obtido pela heurística, e T_{med} é o tempo médio de execução em segundos.

Observando estes resultados, conclui-se que o desempenho da heurística foi muito bom, pois foram encontradas 12 soluções óptimas e as restantes 5 são apenas marginalmente piores do que a óptima. Outro aspecto importante é que, tendo em conta a dimensão considerável do problema, os tempos de execução são perfeitamente aceitáveis. Finalmente, é de referir que a variabilidade das soluções

encontrada, entre as dez execuções da heurística, para cada instância do problema foi nula, no que diz respeito ao número de estações da melhor solução encontrada.

Tabela 4.8 – Comparação dos resultados para o problema de 70 tarefas

C	S*	SH	T _{med} (s)
156	23	24	14
160	23	23	17
168	22	23	27
176	21	22	36
185	20	20	28
195	19	19	29
207	18	18	30
220	17	18	27
234	16	16	9
251	14	14	13
270	14	14	22
293	13	13	27
320	11	12	18
364	10	10	16
410	9	9	17
468	8	8	19
527	7	7	14

Scholl (1993) propôs um conjunto de problemas com estruturas bastante diferentes e que, segundo o autor, é uma óptima base para testar o desempenho de algoritmos para a resolução do PBLMS-I. Os testes efectuados a este conjunto de problemas são apresentados na tabela 4.9. Das 168 instâncias, é conhecida a solução óptima (S*) para 161. As soluções obtidas pela heurística proposta (SH) são óptimas para 76 destes problemas e marginalmente inferiores à óptima nos restantes casos, sendo que no problema em que o desempenho da heurística foi pior a solução encontrada difere da óptima em 14%.

O único instrumento de controlo do processo de “paralelização” permitido pelos procedimentos propostos por Buxey (1974) e Schofield (1979) é a limitação do número de réplicas de cada estação. Definindo, para a heurística proposta, $\alpha=0\%$, anula-se o controlo do processo de “paralelização” com base no tempo de processamento e é assim possível estabelecer uma comparação entre a heurística desenvolvida e os métodos propostos por aqueles autores. Os resultados desta comparação são apresentados na tabela 4.10, onde, para os diferentes problemas, S’ corresponde ao número de total de postos de trabalho e TI(%) corresponde à

percentagem de tempo inactivo. A análise desta tabela permite concluir o excelente desempenho da heurística proposta, que igualou ou melhorou as soluções conhecidas em todos os casos, com a excepção de um.

Tabela 4.9 – Comparação dos resultados para o conjunto de problemas de Scholl (1993)

Problema	C	S*	SH	Problema	C	S*	SH	Problema	C	S*	SH
Rosz(25)	14	10	10	Wee-(75) (cont.)	37	60	60	Barth.(148) (cont.)	626	9	10
	16	8	9		38	60	60		705	8	9
	18	8	8		39	60	60		805	7	8
	21	6	6		40	60	60	Barth2 (148)	84	51	53
	25	6	6		41	59	59		85	50	53
Buxey (29)	32	4	4	[32,33]	42	55	55		87	49	51
	27	13	13		43	50	50		89	48	50
	30	12	12		45	38	39		91	47	49
	33	11	11		46	34	35		93	46	48
	36	10	10		47	32	32		95	45	47
	41	8	9		49	32	32		97	44	46
	47	7	8		50	32	32		99	43	45
Lutz1 (32)	54	7	7	Lutz2 (89)	52	31	31	Scholl (297)	101	42	44
	1414	11	11		54	31	31		104	41	43
	1572	10	11		56	30	30		106	40	42
	1768	9	9		11	49	52		109	39	41
	2020	8	8		12	44	46		112	38	39
Gunth.(35)	2357	7	7	Mukh.(94)	13	40	42		115	37	39
	2828	6	6		14	37	39		118	36	38
	41	14	14		15	34	36		121	35	37
	44	12	12		16	31	33		125	34	35
	49	11	11		17	29	31		129	33	34
	54	9	10		18	28	29		133	32	33
	61	9	9		19	26	27		137	31	32
Hahn (53)	69	8	8		20	25	26		142	30	31
	81	7	7		21	24	25		146	29	30
	2004	8	8		75	23	24		152	28	29
	2338	7	7		79	22	22		157	27	28
	2806	6	6		83	21	21		163	26	27
Warn.(58)	3507	5	5		87	20	21		170	25	26
	4676	4	4		92	19	19		1394	50	52
	54	31	32		97	18	19		1422	50	51
	56	29	31		103	17	18		1452	48	49
	58	29	29		110	15	16		1483	[47,48]	48
	60	27	29		118	14	15		1515	[46,47]	48
	62	27	29		127	14	14		1548	46	46
Wee-(75)	65	25	27		137	13	13		1584	44	46
	68	24	25		150	12	12		1620	44	44
	71	23	24		176	25	25		1659	[42,43]	44
	74	22	23		183	24	24		1699	[41,42]	42
	78	21	21		192	23	23		1742	40	41
	82	20	20		201	22	22		1787	39	40
	86	19	19		211	21	21		1834	38	39
	92	17	18		222	20	20		1883	37	38
	97	17	17		234	19	19		1935	36	37
	104	15	16		248	18	18		1991	35	36
	111	14	15		263	17	17		2049	34	35
	28	63	63		281	16	16		2111	33	34
	29	63	63		301	15	15		2177	32	33
	30	62	62		324	14	14		2247	31	32
	31	62	62		351	13	13		2322	30	31
	32	61	61		403	14	15		2402	29	30
	33	61	61		434	13	14		2488	28	29
	34	61	61		470	12	13		2580	27	28
	35	60	60		513	11	12		2680	26	27
	36	60	60		564	10	11		2787	25	26

Tabela 4.10 – Comparação dos resultados para os problemas de Buxey (1974) e Schofield (1979)

Problema	Solução original		Solução heurística	
	S'	TI(%)	S'	TI(%)
Buxey 1	9	0	10	3,7
2	6	0	6	0
3	13	4,14	13	2,16
4	13	4,14	13	1,44
5	13	4,14	13	1,16
6	8	1,23	8	1,23
Schofield	14	-	13	-

4.3.4.2 Limite inferior para o número de postos de trabalho

A impossibilidade de se avaliar o desempenho da heurística proposta por comparação com outras técnicas referidas na literatura, em resultado da inclusão de características inovadoras no problema de balanceamento de linhas, levou a que se desenvolvesse uma metodologia para calcular um limite inferior para o problema em causa, por forma a se avaliar o desempenho da heurística para um conjunto alargado de problemas, definidos recorrendo ao gerador de problemas descrito no Apêndice B.

Uma revisão aprofundada de diferentes metodologias de cálculo de limites inferiores para o problema de balanceamento de linhas de montagem simples foi efectuada por Scholl (1999), não referindo, contudo, a existência de qualquer processo de cálculo de limites inferiores para problemas de balanceamento de linhas com postos paralelos.

Assim, foi desenvolvida uma metodologia para calcular um limite inferior do número de postos de trabalho de uma solução do problema de balanceamento de linhas de montagem com postos paralelos (LB_p), baseada nos seguintes pressupostos:

- (i) o número máximo de réplicas permitido para cada estação é duas ($MAXP=2$);
- (ii) só é permitido duplicar uma estação se o tempo de processamento de uma tarefa afectada a essa estação exceder o tempo de ciclo ($\alpha=100\%$);
- (iii) o tempo de processamento da tarefa mais longa é não superior ao dobro do tempo de ciclo ($t_{max} \leq 2C$).

De seguida, descrevem-se os passos necessários para o cálculo de LB_p , os quais são ilustrados recorrendo ao exemplo numérico descrito na secção 4.3.3.4.

1) Classificar as tarefas segundo o tempo de processamento, como se mostra na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Classificação das tarefas para o cálculo de L_p

Tipo	Tempo de processamento	Tarefas
A	$\frac{5}{3}C < t_A \leq 2C$	-
B	$\frac{4}{3}C < t_B \leq \frac{5}{3}C$	23
C	$C < t_C \leq \frac{4}{3}C$	21
D	$\frac{2}{3}C < t_D \leq C$	3,6,15,19
E	$\frac{1}{3}C < t_E \leq \frac{2}{3}C$	7,10,18,25
F	$t_F = \frac{5}{3}C$	-
G	$t_G = \frac{4}{3}C$	16
H	$t_H = \frac{2}{3}C$	4,5,13
I	$t_I = \frac{1}{3}C$	2,8,9,11,14,17
J	$t_J < \frac{1}{3}C$	1,12,20,22,24

2) Calcular LB' .

$$LB' = \left\lceil 2(n_A + n_B + n_C) + y(n_D - n_C) + \frac{1}{2}w(n_E - n_B) + \frac{5}{3}n_F + \frac{4}{3}n_G + \frac{2}{3}n_H + \frac{1}{3}n_I \right\rceil \quad (10)$$

onde:

- n_X = número de tarefas do tipo X ($X=A, \dots, I$),
- $y = \begin{cases} 1, \text{ se } n_D - n_C > 0 \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
- $w = \begin{cases} 1, \text{ se } n_E - n_B > 0 \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$

As tarefas longas, pertencentes aos tipos A, B e C, têm que originar uma duplicação da estação onde são executadas. Como duas destas tarefas não podem partilhar a mesma estação, pois seria excedido o valor de MAXP, um limite inferior do número total de postos (que inclui todas as réplicas) é o dobro do número de tarefas dos tipos A, B e C.

Cada tarefa do tipo D dá origem a uma estação, a não ser que seja combinada com uma tarefa do tipo C numa estação duplicada. É possível a combinação de duas tarefas do tipo E numa estação, sendo o número de estações originado igual a metade do número total destas tarefas. No entanto, podem também ser combinadas com tarefas do tipo B em estações duplicadas.

Finalmente, as tarefas dos tipos F, G, H e I, que têm um tempo definido, dão origem a frações de estação correspondentes à relação entre o tempo de processamento e o tempo de ciclo. O valor de LB' é arredondado para o maior número inteiro.

Para o exemplo numérico, a expressão (10) vem:

$$LB' = \left\lceil 2(0+1+1) + (4-1) + \frac{1}{2}(4-1) + 0 + \frac{4}{3} + \frac{2}{3} \cdot 3 + \frac{1}{3} \cdot 6 \right\rceil = 14$$

LB' é o principal termo de LB_p , e é uma adaptação de um dos processos de cálculo de um limite inferior (LB_3) para o problema de balanceamento de linhas de modelo simples, descrito por Scholl (1999).

3) Calcular Δ .

$$\Delta = \left\lceil \left(\sum_{i \in J} t_i - \left(LB' \cdot C - \sum_{i \notin J} t_i \right) \right) / C \right\rceil \quad (11)$$

As tarefas do tipo J têm um peso muito grande na maioria dos problemas. Uma vez que estas tarefas podem facilmente ser encaixadas nas estações já formadas, há que verificar se, após a sua inclusão nessas estações ainda restam tarefas para a formação de novas estações (originando Δ estações novas).

Para o exemplo numérico vem: $\Delta = \lceil (8 - (14 \cdot 9 - 120)) / 9 \rceil = 1$

4) Calcular $LB_p = LB' + \Delta$.

Para o exemplo numérico, $LB_p = 14 + 1 = 15$.

4.3.4.3 Testes a problemas gerados

A heurística foi testada num conjunto de 21 problemas cujas principais características, nomeadamente o número de tarefas (N) e o tempo de ciclo (C) são apresentadas na tabela 4.12. Os diagramas de precedências foram retirados de Scholl

(1993), excepto o diagrama do problema de 25 tarefas que corresponde ao exemplo numérico introduzido na secção 4.3.3.4. O tempo de ciclo e os tempos de processamento das tarefas foram gerados de acordo com a metodologia descrita no Apêndice B. Os seguintes valores são também apresentados, na tabela 4.12, para cada problema:

- (i) o número total de postos de trabalho da melhor solução encontrada pela heurística (SH);
- (ii) o limite inferior para o número total de postos de trabalho (LB_p);
- (iii) a diferença percentual entre o número total de postos de trabalho para a melhor solução obtida pela heurística e o limite inferior correspondente $(D(\%) = (SH - LB_p) / LB_p)$.

Tabela 4.12 – Resultados computacionais para os problemas de balanceamento de linhas de modelo-simples

Problema	N	C	LB_p	SH	D(%)
1	25	10	19	19	0
2	25	12	19	20	5
3	25	15	18	20	10
4	28	10	20	20	0
5	28	12	19	19	0
6	28	15	21	21	0
7	30	10	20	20	0
8	30	12	20	21	5
9	30	15	19	21	10
10	32	10	22	24	8
11	32	12	21	23	9
12	32	15	20	21	5
13	35	10	23	25	8
14	35	12	22	23	4
15	35	15	18	20	10
16	45	10	26	29	10
17	45	12	28	28	0
18	45	15	31	33	6
19	70	10	43	45	4
20	70	12	37	39	5
21	70	15	29	29	0

Para cada problema, a heurística foi testada 10 vezes, não tendo apresentado qualquer variância no valor do número de postos de trabalho da melhor solução encontrada (SH).

Dado que, para o cálculo do limite inferior LB_p , não são consideradas as restrições de precedência nem as restrições de zona, e que a variação percentual mais elevada entre o valor da solução da heurística e o limite inferior foi de 10 %, pode concluir-se que a heurística apresenta um excelente desempenho para este conjunto de problemas.

4.4 Balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto

Nos últimos anos tem-se assistido a uma transformação dos mercados mundiais, caracterizada pela redução do ciclo de vida dos produtos, pelo aumento da oferta (e, conseqüentemente, por uma menor padronização dos produtos) e pelo crescimento contínuo das expectativas dos consumidores.

Esta transformação tem um forte impacto nas empresas industriais, uma vez que corresponde a um aumento da frequência de recepção de encomendas, nas quais se solicitam uma cada vez maior variedade de produtos em cada vez menores quantidades. Assim, as pressões competitivas vão no sentido das empresas reduzirem os custos, os tamanhos dos lotes e os tempos totais de produção, aumentando a qualidade.

As linhas de montagem são o tipo de sistema de produção menos indicado para produzir uma grande variedade de produtos, em particular, como é óbvio, as de modelo-simples. No entanto, permitem produzir com baixos custos, tempos de ciclo reduzidos e níveis de qualidade aceitáveis. Assim, a introdução de linhas de montagem de modelo-misto, nas quais vários modelos ou versões do mesmo produto são montados conjuntamente, permite uma melhor adaptação deste tipo de sistema de produção às actuais condições dos mercados.

A variedade de modelos que podem ser montados numa linha deste tipo é limitada, uma vez que a maioria das tarefas tem que ser comum a todos os modelos e os componentes básicos têm que ser semelhantes em todas as versões, por forma a se garantir a estabilidade do balanceamento da linha e, conseqüentemente, uma elevada taxa de utilização.

O modelo de programação matemática para o problema do balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto com postos paralelos e restrições de zona, que

se apresenta nas secções seguintes, mantém essencialmente as mesmas características do modelo proposto para as linhas de modelo-simples.

De notar que o modelo teve que ser ajustado por forma a não só entrar em linha de conta com a multiplicidade de versões, mas ainda com o facto de haver a necessidade de se equilibrarem as cargas entre as várias estações e os vários modelos. De facto, um dos principais problemas no balanceamento de linhas de modelo-misto advém do facto de os tempos de processamento das tarefas poderem variar de modelo para modelo, pelo que os operadores das várias estações podem ser confrontados com momentos de sobrecarga ou de ausência de trabalho na montagem dos diferentes modelos

4.4.1 Modelo de programação matemática

O modelo proposto para o balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto com postos paralelos e restrições de zona é uma extensão do modelo apresentado para o caso das linhas de montagem de modelo-simples, apresentado no capítulo 4.3. Nesta extensão foram considerados os seguintes pressupostos adicionais:

- (i) um conjunto limitado de modelos ($m=1, \dots, M$) é montado simultaneamente numa linha, ao longo de um período de planeamento de dimensão fixa (T);
- (ii) o volume global de produção do modelo m é D_m , para o horizonte de planeamento definido;
- (iii) as relações de precedência de cada um dos modelos podem ser combinadas num único conjunto de restrições de precedência, o qual pode ser representado por um diagrama de precedências contendo N tarefas;
- (iv) as tarefas comuns a vários modelos são, obrigatoriamente, realizadas na mesma estação, podendo, no entanto, ter tempos de processamento diferentes – t_{im} representa o tempo de processamento da tarefa i para o modelo m (se $t_{im}=0$, então a tarefa i não está definida no processo de montagem do modelo m);
- (v) uma estação pode ser replicada ou “paralelizada” até um máximo de $MAXP$ réplicas, mas apenas se o tempo de processamento de uma das tarefas afectadas a essa estação exceder um valor pré-definido ($\alpha\%$ do tempo de ciclo) para, pelo menos, um dos modelos.

Da definição destes pressupostos resulta que a linha tem que ser operada com um tempo de ciclo $C = T / \sum_{m=1}^M D_m$ e que a quota de produção do modelo m é

$$q_m = D_m / \sum_{p=1}^M D_p.$$

As variáveis de decisão são definidas, tal como para o modelo de programação matemática para as linhas de modelo-simples, da seguinte forma:

- $x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa } i \text{ é afectada à estação } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $r_k = \begin{cases} 1, & \text{se a estação } k \text{ pode ser replicada} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- s_{km} – tempo inactivo da estação k após o processamento do modelo m .

Dado que o processamento de uma mesma tarefa para os vários modelos tem que ser realizado na mesma estação, optou-se por manter as variáveis de decisão x_{ik} e r_k iguais ao caso da linha de modelo-simples, sendo, deste modo, esta condição necessariamente cumprida.

O problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto com postos paralelos e restrições de zona pode ser formulado como um problema de programação matemática, conforme se apresenta na figura 4.7. Este modelo minimiza o número de postos de trabalho para um dado tempo de ciclo e, simultaneamente, equilibra as cargas de trabalho dos modelos entre as diversas estações (E_m) e dentro de cada estação para os vários modelos (E_k).

A função objectivo (12) está dividida em três termos. O primeiro minimiza o número de postos de trabalho e é idêntico ao primeiro termo da função objectivo definida para a linha de modelo-simples.

O segundo termo visa equilibrar a carga de trabalho de cada modelo entre as várias estações (E_m). Neste termo, S' representa o número total de estações requeridas para satisfazer a produção de todos os modelos, incluindo os postos paralelos.

O terceiro termo equilibra a carga de trabalho dos vários modelos dentro de cada estação (E_k). Neste termo $S_k = \sum_{m=1}^M q_m \cdot s_{km}$.

$$\begin{aligned}
\text{Min} \quad & \sum_{k=1}^S k \cdot x_{Nk} + \frac{S'}{S'-1} \sum_{m=1}^M q_m \sum_{k=1}^S \left(\frac{s_{km}}{\sum_{l=1}^S s_{lm}} - \frac{1}{S'} \right)^2 + \frac{M}{S'(M-1)} \sum_{k=1}^S \left(\frac{q_m s_{km}}{S_k} - \frac{1}{M} \right)^2 \quad (12) \\
\text{s.a} \quad & \sum_{k=1}^S x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (13) \\
& \sum_{k=1}^S x_{ak} - \sum_{k=1}^S x_{bk} \leq 0 \quad a \in N; b \in F_a \quad (14) \\
& \sum_{k=1}^S x_{ak} - \sum_{k=1}^S x_{bk} = 0 \quad (a, b) \in ZP \quad (15) \\
& x_{ak} + x_{bk} \leq 1 \quad (a, b) \in ZN; k = 1, \dots, S \quad (16) \\
& \sum_{i=1}^N t_{im} \cdot x_{ik} + s_{km} = C[1 + r_k (\text{MAXP} - 1)] \quad m = 1, \dots, M; k = 1, \dots, S \quad (17a) \\
& r_k \leq \sum_{i: \exists t_{im} > \alpha C, m=1, \dots, M} x_{ik} \quad k = 1, \dots, S; 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (17b) \\
& \mathcal{M} \cdot r_k \geq \sum_{i: \exists t_{im} > \alpha C, m=1, \dots, M} x_{ik} \quad k = 1, \dots, S; 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (17c) \\
& \mathcal{M} \text{ é um inteiro positivo muito grande} \\
& s_{km} \geq 0 \quad m = 1, \dots, M; k = 1, \dots, S \quad (18a) \\
& x_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, S \quad (18b) \\
& r_k \in \{0, 1\} \quad k = 1, \dots, S \quad (18c)
\end{aligned}$$

Figura 4.7 – Modelo de programação matemática para o problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto com postos paralelos e restrições de zona

Tanto o segundo como o terceiro termos variam no intervalo $[0,1]$, logo, o primeiro termo da função objectivo é sempre dominante para $S' > 2$, o que acontece sempre na aplicação a problemas reais. Assim, o modelo minimiza, em primeiro lugar, o número de postos de trabalho e só depois é que o objectivo secundário do equilíbrio das cargas é activado.

As restrições do modelo matemático são idênticas às do caso das linhas de modelo-simples, excepto o conjunto de restrições (17), que foi adaptado para a montagem conjunta de vários modelos. Este conjunto de restrições garante que as estações só podem ser replicadas quando realizam tarefas que têm tempos de processamento superiores a uma certa proporção do tempo de ciclo ($\alpha\%$), para, pelo menos, um dos modelos. Além disso, garantem também que a capacidade das estações e o número máximo de postos paralelos por estação não são excedidos.

Uma heurística, baseada no algoritmo de recristalização simulada, foi desenvolvida para resolver este problema, o qual, à semelhança do problema de balanceamento de linhas de modelo-simples, tem uma complexidade que não permite

a resolução exacta de problemas de grande dimensão em tempo real. Nos pontos seguintes descreve-se essa heurística.

4.4.2 Heurística proposta

As principais características da heurística para o balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto com postos paralelos e restrições de zona, em complemento das já definidas para a heurística descrita na secção 4.3.3, são as seguintes:

- (i) o principal objectivo é a minimização do número de postos de trabalho, para um dado tempo de ciclo,
- (ii) os objectivos adicionais de equilíbrio das cargas de trabalho entre as estações e dentro de cada estação são também considerados,
- (iii) o valor do tempo mínimo de paralelização (MPT) é, por defeito, igual ao tempo de ciclo ($\alpha=100\%$), o que significa que apenas as estações que executam tarefas com tempos superiores ao tempo de ciclo para, pelo menos, um modelo, podem ser duplicadas. Este valor pode ser alterado pelo utilizador.

A estrutura desta heurística é muito semelhante à desenvolvida para as linhas de modelo-simples, estando, também, dividida em duas fases que utilizam o algoritmo de recristalização simulada. Na primeira fase, é encontrada uma solução sub-ótima para o principal objectivo do problema, a minimização do número de postos de trabalho. Na segunda fase são considerados os objectivos adicionais de equilíbrio das cargas de trabalho.

Os parâmetros do algoritmo de recristalização simulada utilizados em ambas as fases da heurística são idênticos aos definidos na secção 4.3.3.3. De seguida, são descritas as principais características das duas fases da heurística.

4.4.2.1 Primeira fase

O objectivo da primeira fase é a obtenção de um balanceamento da linha de montagem com o menor número possível de postos de trabalho.

Determinação da solução inicial

Tal como no caso das linhas de modelo-simples, a solução inicial do algoritmo é obtida adaptando a heurística RPW às características deste problema. Como se trata de uma linha de modelo-misto, o peso posicional de cada tarefa é calculado a partir do seu tempo médio. O tempo médio de uma tarefa corresponde à soma dos tempos de processamento dessa tarefa para cada modelo, pesados pela respectiva quota de produção. Assim, o peso posicional de uma tarefa consiste no somatório dos tempos médios de processamento da própria tarefa e de todas as outras que, obrigatoriamente, a devem suceder na sequência de montagem.

Dado que a solução inicial é apenas o ponto de partida para o algoritmo de melhoramento, a sua qualidade pode não ser a ideal e, por isso, são admitidas algumas relaxações relativamente aos pressupostos do modelo. Assim, a formação das estações é feita de um modo semelhante ao utilizado para linhas de modelo-simples, tendo em conta o tempo de ciclo da linha (C).

Na obtenção da solução inicial, utilizam-se os tempos médios de processamento de cada tarefa ($\bar{t}_i = \sum_{m=1}^M t_{im} \cdot q_m$, $i=1, \dots, N$), e não, como nos passos seguintes do procedimento, os tempos das tarefas específicos de cada modelo.

A utilização de postos de trabalho paralelos está limitada às estações onde são executadas tarefas com um tempo médio de processamento superior a uma proporção ($\alpha\%$) do tempo de ciclo da linha.

Definição da função objectivo

Na primeira fase, a heurística tenta obter uma solução com um número mínimo de postos de trabalho. Tal como no caso das linhas de montagem de modelo-simples, a função objectivo minimiza o tempo inactivo da linha (TI) que, para o caso das linhas de modelo-misto, é dado por:

$$TI = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^S q_m \cdot (R_k \cdot C - \sum_{i \in O_k} t_{im}) \quad (19)$$

onde:

- q_m é a quota de produção do modelo m ;
- t_{im} é o tempo de processamento da tarefa i para o modelo m ;

- R_k é o número de réplicas ou de postos paralelos da estação k na linha;
- O_k é o conjunto de tarefas afectadas à estação k .

Soluções vizinhas

Uma solução vizinha de uma solução de balanceamento é obtida a partir de um movimento de troca ou de transferência, à semelhança do que foi descrito para as linhas de modelo-simples, sendo também utilizada uma lista tabu para evitar a entrada do procedimento em ciclo.

4.4.2.2 Segunda fase

O objectivo da segunda fase da heurística é o de equilibrar simultaneamente as cargas dos vários modelos entre as estações e dentro de cada estação, para o número de estações obtido na primeira fase. A solução inicial desta fase é a melhor solução apresentada pelo procedimento para a primeira fase. Os critérios utilizados para avaliar as soluções vizinhas derivam directamente dos segundo e terceiro termos da função objectivo do modelo apresentado na figura 4.7 (E_m e E_k).

Soluções vizinhas

A geração de soluções vizinhas na segunda fase também é feita a partir de movimentos de troca e de transferência, com probabilidades, por defeito, de 75% e 25%, respectivamente, no entanto, em vez de movimentos aleatórios, fazem-se movimentos que, à partida, dêem origem a soluções com melhor valor da função objectivo, como a seguir se descrevem.

Movimento de troca

- 1) Seleccionar aleatoriamente uma estação (Z). Seja X o modelo cujo tempo inactivo para essa estação tem o maior desvio relativamente ao tempo

$$\text{inactivo médio da estação } (X: \Delta s_{ZX} = \max_m \left\{ s_{Zm} \cdot q_m - \frac{S_Z}{M} \right\}).$$

- 2) Se $s_{ZX} > \frac{S_Z}{M}$, seguir para o passo 3) senão seguir para o passo 5).
- 3) Seleccionar a tarefa afectada à estação Z com o menor tempo de processamento para o modelo X ($T_1: t_{TX} = \min_i \{t_{ix}\} \wedge i \in O_Z$).

- 4) Seleccionar aleatoriamente uma tarefa não afectada à estação Z com tempo de processamento para o modelo X superior ao tempo de T_1 ($T_2 : t_{T_2X} > t_{T_1X} \wedge T_2 \notin O_Z$). Seguir para o passo 7).
- 5) Seleccionar a tarefa afectada à estação Z com o maior tempo de processamento para o modelo X ($T_1 : t_{T_1X} = \max_i \{t_{iX}\} \wedge i \in O_Z$).
- 6) Seleccionar aleatoriamente uma tarefa não afectada à estação Z com tempo de processamento para o modelo X inferior ao tempo de T_1 ($T_2 : t_{T_2X} < t_{T_1X} \wedge T_2 \notin O_Z$).
- 7) Se as restrições de precedência, zona, capacidade e número de estações são verificadas, trocar as tarefas T_1 e T_2 .

Movimento de transferência

- 1) Seleccionar aleatoriamente uma estação (Z). Seja X o modelo cujo tempo inactivo para essa estação tem o maior desvio relativamente ao tempo inactivo médio da estação ($X : \Delta s_{ZX} = \max_m \left\{ s_{Zm} \cdot q_m - \frac{S_Z}{M} \right\}$).
- 2) Se $s_{ZX} > \frac{S_Z}{M}$, seguir para o passo 3) senão seguir para o passo 5).
- 3) Seleccionar uma tarefa não afectada à estação Z com tempo de processamento para o modelo X superior ao tempo para os outros modelos ($T_1 : t_{T_1X} = \max_m \{t_{T_1m}\} \wedge i \notin O_Z$).
- 4) Se as restrições de precedência, zona, capacidade e número de estações são verificadas, transferir a tarefa T_1 para a estação Z. Terminar.
- 5) Seleccionar a tarefa afectada à estação Z com o maior tempo de processamento para o modelo X ($T_1 : t_{T_1X} = \max_i \{t_{iX}\} \wedge i \in O_Z$).
- 6) Seleccionar aleatoriamente um estação (W) em que o tempo inactivo para o modelo X é inferior ao tempo inactivo médio da estação ($W : s_{WX} < \frac{S_W}{M}$).
- 7) Se as restrições de precedência, zona, capacidade e número de estações são verificadas, transferir a tarefa T_1 para a estação W.

Se, após um determinado número de tentativas, não for possível encontrar uma solução vizinha a partir dos movimentos descritos anteriormente, então são geradas aleatoriamente as tarefas e estações envolvidas nos movimentos de troca e transferência, tal como na primeira fase da heurística.

4.4.2.3 Exemplo numérico

O funcionamento da heurística é ilustrado com um exemplo numérico, com as seguintes características:

- (i) são produzidos simultaneamente dois modelos, A e B com procura de 20 e 28 unidades, respectivamente, para um período de produção de 480 u.t. (unidades de tempo);
- (ii) a combinação das restrições de precedência para os dois modelos resulta no diagrama de precedências apresentado na figura 4.6, o qual tem 25 tarefas;
- (iii) os tempos de processamento das tarefas para cada um dos modelos (t_A e t_B) são apresentados na tabela 4.13;
- (iv) as tarefas 9 e 10 não podem ser executadas na mesma estação;
- (v) apenas as estações que executam tarefas com tempos de processamento superiores ao tempo de ciclo podem ser replicadas ($\alpha=100\%$);
- (vi) o número máximo de réplicas para cada estação é duas ($MAXP=2$).

A solução inicial é determinada utilizando a versão para modelo-misto da heurística RPW, descrita na secção 4.4.2.1, em que o peso posicional é calculado com base nos tempos médios de processamento de cada tarefa. O tempo médio de processamento de uma tarefa corresponde ao somatório dos tempos de processamento da tarefa para cada modelo multiplicados pela respectiva quota de produção. Para o exemplo em causa, a quota de produção do modelo A é igual a 0,42 e a do modelo B a 0,58. O tempo de ciclo com que a linha deve ser operada para satisfazer a procura é de $C=10$ u.t. ($C=480/(20+28)$). Os tempos médios de processamento ($\bar{t}$) e os pesos posicionais médios de cada tarefa (PP médio) são apresentados na tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Tempos de processamento e pesos posicionais médios para o exemplo numérico de uma linha de modelo-misto

Tarefa	t_A	t_B	$\bar{t}$	PP médio
1	0	2,0	1,2	115,4
2	7,7	7,7	7,7	54,4
3	7,3	7,3	7,3	114,2
4	15,0	15,0	15,0	46,6
5	8,8	8,8	8,8	85,3
6	6,2	0	2,6	66,2
7	3,6	0	1,5	15,8
8	0	2,0	1,2	31,6
9	6,6	6,6	6,6	38,9
10	2,5	2,5	2,5	46,7
11	5,5	5,5	5,5	61,1
12	7,1	7,1	7,1	30,5
13	5,9	5,9	5,9	55,6
14	1,3	0	0,5	19,7
15	5,5	5,5	5,5	23,4
16	1,9	2,0	2,0	44,2
17	3,7	0	1,6	26,3
18	9,4	9,4	9,4	33,8
19	1,3	1,3	1,3	19,2
20	0	9,0	5,2	14,3
21	2,0	2,0	2,0	24,8
22	4,7	4,7	4,7	13,8
23	9,6	8,2	8,8	17,9
24	4,1	3,7	3,9	9,1
25	12,5	0	5,3	5,2

A figura 4.8 ilustra a aplicação de alguns passos da heurística ao exemplo numérico. Nesta figura, cada tabela representa uma solução de balanceamento. Para simplificar a figura, apenas as estações onde ocorreram modificações são representadas nas soluções vizinhas. O conteúdo de cada coluna nestas tabelas é o seguinte:

- (i) índice da estação, S ;
- (ii) conjunto das tarefas afectadas à estação, “Tarefas”;
- (iii) número de réplicas de cada estação, R .

A última linha de cada tabela mostra o número total de estações (incluindo os postos paralelos) para essa solução, S' , e os valores das funções equilíbrio de cada modelo entre as estações (E_m) e equilíbrio dos vários modelos dentro de cada estação

(E_k), calculados a partir dos segundo e terceiro termos, respectivamente, da função objectivo do modelo de programação matemática apresentado na secção 4.4.1.

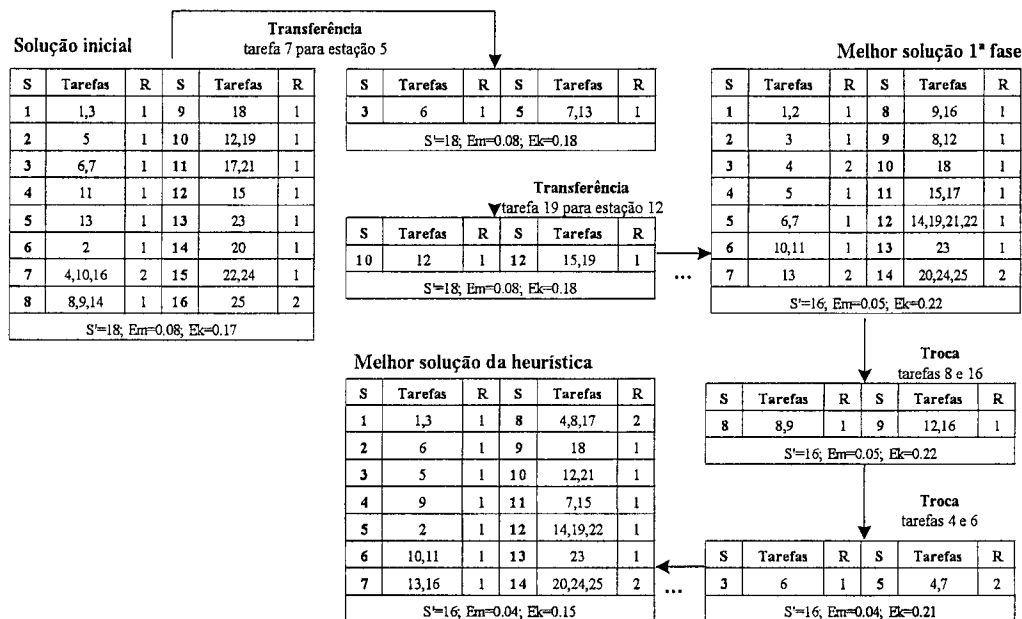


Figura 4.8 – Ilustração da heurística para o exemplo da linha de modelo-misto

A solução inicial apresenta 18 postos de trabalho e, após os dois primeiros movimentos (ambos movimentos de transferência), esse número permanece inalterado. A melhor solução da primeira fase da heurística apresenta 16 postos de trabalho e valores do equilíbrio de cargas de $E_m=0,05$ e $E_k=0,22$. A melhor solução da primeira fase é utilizada como solução inicial da segunda fase. Durante a segunda fase, o número de postos de trabalho permanece constante, enquanto o equilíbrio total das cargas ($E_m + E_k$) diminui, mostrando a melhor solução uma melhoria de cerca de 30%.

4.4.3 Experiência computacional

A heurística proposta para o balanceamento de linhas de montagem de modelo-misto com postos paralelos e restrições de zona foi implementada em linguagem C e executada num PC com um processador Pentium II a 350 MHz.

Para avaliar o desempenho da heurística, foram testados 20 problemas com postos paralelos e restrições de zona. Para um conjunto de quatro problemas, em que o modelo de programação matemática foi modificado por forma a considerar apenas o primeiro termo da função objectivo (12), foi encontrada a solução óptima utilizando o programa Cplex, o que permitiu verificar que a heurística proposta atingiu a

solução óptima para estas instâncias (ver tabela 4.15). Para os problemas de maior dimensão não foi possível encontrar a solução óptima dentro de um limite de tempo razoável. Assim, para avaliar o desempenho da heurística, foi calculado um limite inferior para o número de postos de trabalho.

4.4.3.1 Limite inferior para o número de postos de trabalho

A metodologia para calcular o limite inferior para o número de postos de trabalho de uma linha de montagem de modelo-misto é idêntica à descrita na secção 4.3.4.2, para o caso das linhas de modelo-simples. A única diferença é que se executam todos os passos para cada modelo individualmente e, no final, o valor do limite inferior do problema (LB_{pmix}) corresponde ao valor máximo dos limites inferiores individuais:

$$LB_{pmix} = \max_m (LB_p(m)) \quad (20)$$

Para o exemplo numérico descrito na secção 4.4.2.3, são, a seguir, descritos os passos para o cálculo de LB_{pmix} , tendo em conta os conceitos e a nomenclatura utilizados para o cálculo de LB_p (ver secção 4.3.4.2).

- 1) A tabela 4.14 apresenta a classificação das tarefas, segundo o seu tempo de processamento.

Tabela 4.14 – Classificação das tarefas para o cálculo de LB_{pmix}

Tipo	Tarefas	
	Modelo A	Modelo B
A	-	-
B	4	4
C	25	-
D	2,3,5,12,18,23	2,3,5,12,18,20,23
E	6,7,9,11,13,15,17,22,24	9,11,13,15,22,24
F	-	-
G	-	-
H	-	-
I	-	-
J	1,8,10,14,16,19,20,21	1,6,7,8,10,14,16,17,19,21,25

- 2) Para cada modelo, calcular $LB'(m)$.

$$LB'(A) = \left\lceil \left(2(0+1+1) + (6-1) + \frac{1}{2}(9-1) \right) \right\rceil = 13$$

$$LB'(B) = \left\lceil \left(2(0+1+0) + (7-0) + \frac{1}{2}(6-1) \right) \right\rceil = 12$$

- 3) Para cada modelo, calcular $\Delta(m)$.

$$\Delta(A) = \lceil (9 - (13 \cdot 10 - 123,2)) / 10 \rceil = 1; \Delta(B) = \lceil (11,8 - (12 \cdot 10 - 104,4)) / 10 \rceil = 0$$

- 4) Para cada modelo, calcular $LB_p(m)$.

$$LB_p(A) = 13 + 1 = 14; LB_p(B) = 12 + 0 = 12.$$

- 5) Seleccionar LB_{pmix} para o problema.

$$LB_{pmix} = LB_p(A) = 14.$$

4.4.3.2 Testes a problemas gerados

Foram testados 20 problemas de várias dimensões. A tabela 4.15 apresenta as características da cada problema, nomeadamente, o número de tarefas do diagrama de precedências combinado (N), o número de modelos a montar na linha (M) e o tempo de ciclo da linha (C). Os diagramas de precedências foram retirados da literatura, excepto o diagrama de 25 tarefas que foi gerado e utilizado no exemplo numérico apresentado na secção 4.4.2.4, e que podem ser consultados em Scholl (1993) ou, no caso dos problemas de 11 tarefas, em Göcken e Erel (1998). Os tempos de processamento e os tempos de ciclo foram gerados, utilizando o gerador de problemas descrito no Apêndice B, tendo em conta os diferentes tipos de tarefas que podem estar presentes em processos de montagem industriais.

Para cada problema, a heurística foi testada dez vezes, sendo apresentados, na tabela os valores mínimos, máximos e médios das soluções encontradas, relativamente ao número de postos de trabalho. Uma comparação entre estes valores e os valores obtidos a partir do programa Cplex (S*) e os limites inferiores (LB_{pmix}) é apresentada na décima coluna (D(%)), onde a diferença percentual entre o valor mínimo apresentado pela heurística e o valor de LB_{pmix} ou o valor da solução óptima é calculada.

Para os problemas de pequena dimensão (para os quais foi encontrada a solução óptima) a heurística proposta conduz à solução óptima. Para problemas de maior dimensão, a heurística apresenta o seu pior desempenho para o problema 15, onde a diferença entre as soluções encontradas e o LB_{pmix} é de 20%. De qualquer modo, dado que para o cálculo do limite inferior, LB_{pmix} , não são consideradas nem as restrições de precedência nem as restrições de zona, pode concluir-se que o desempenho da heurística é muito bom. Esta conclusão é apoiada pelos valores da

eficiência média, apresentada na décima primeira coluna (Ef_{med} (%)), onde se observam valores elevados da taxa de utilização da linha de montagem. O valor da eficiência média foi calculado a partir da expressão seguinte:

$$Eficiência\ Média = \sum_{m=1}^M \left[q_m \cdot \frac{\sum_{i=1}^N t_{im}}{S' \cdot C} \right]$$

(21)

onde S' representa o valor mínimo do número de postos de trabalho encontrado pela heurística.

Tabela 4.15 – Resultados computacionais para os problemas de balanceamento de linhas de modelo-misto

Problema	N	M	C	LB _{pmix}	S*	Solução heurística					Ef _{med} (%)	T _{med} (s)
						Média	Min	Max	D(%)			
1	8	2	10	4	4	4	4	4	0	85.6	1	
2	8	3	10	6	8	8	8	8	0	54.9	1	
3	11	2	10	7	7	7	7	7	0	71.0	1.4	
4	11	3	10	6	7	7	7	7	0	76.5	1	
5	21	2	10	14	-	16	16	16	14.3	72.6	1	
6	21	3	10	13	-	15	15	15	15.4	79.6	4.4	
7	25	2	10	14	-	16	16	16	14.3	76.8	21.6	
8	25	3	10	14	-	15	15	15	7.1	82.0	6.6	
9	28	2	10	19	-	21	21	21	10.5	86.5	10.4	
10	28	3	10	18	-	20	20	20	11.1	83.2	10	
11	30	2	10	15	-	16.2	16	17	6.7	86.6	11.6	
12	30	3	10	17	-	19.4	19	20	11.8	83.4	12.6	
13	32	2	10	16	-	19	19	19	18.8	77.3	3.4	
14	32	3	10	17	-	19	19	19	11.8	81.0	8.4	
15	35	2	10	20	-	24	24	24	20.0	80.0	7.2	
16	35	3	10	21	-	24	24	24	14.3	85.2	10	
17	45	2	10	23	-	25.2	25	26	8.7	85.4	11.6	
18	45	3	10	24	-	28.2	28	29	16.7	81.4	13.8	
19	70	2	10	41	-	44	44	44	7.3	87.0	15	
20	70	3	10	39	-	44.2	44	45	12.8	86.0	20	

Finalmente, os tempos de execução médios para cada problema são apresentados na última coluna da tabela 4.15 (T_{med} (s)), mostrando que o esforço computacional requerido para obter as soluções é perfeitamente aceitável, mesmo para os problemas de dimensão elevada.

Em conclusão

Conteúdo

- Conclusões gerais
- Perspectivas de desenvolvimento futuro

5.1 Conclusões gerais

O principal objectivo do trabalho que acabou de ser descrito foi o de propor uma nova abordagem para a resolução do problema de balanceamento de linhas de montagem com postos paralelos e restrições de zona, aplicável tanto a linhas de modelo-simples como de modelo-misto. Esta abordagem distingue-se de outras, publicadas na literatura relevante, pelo facto de permitir ao decisor controlar o processo de “paralelização” das estações com base nos tempos de processamento das tarefas.

A utilização intensiva de mão-de-obra é uma das principais características da operação de linhas de montagem. Assim, dados os elevados custos associados à mão-de-obra, é crucial que os sistemas de produção deste tipo sejam operados com elevadas taxas de utilização. A obtenção de soluções de boa qualidade para o problema de balanceamento de linhas de montagem permite obter uma divisão adequada das tarefas entre os diferentes postos de trabalho, maximizando, assim, a taxa de utilização das linhas. Por isto, justifica-se plenamente o investimento na pesquisa de modelos que traduzam, tão fielmente quanto possível, as condições reais de operação deste tipo de sistemas de produção, bem como o desenvolvimento de técnicas que permitam a resolução desses modelos.

A revisão da literatura relevante para este problema revelou que o esforço de investigação tem incidido essencialmente no desenvolvimento das técnicas, em detrimento do desenvolvimento de modelos que melhor traduzam as condições de operação das linhas de montagem. Os modelos de programação matemática apresentados neste trabalho foram desenvolvidos por forma a incluir aspectos relevantes da operação deste tipo de sistemas de produção e as heurísticas propostas permitem a resolução dos problemas de balanceamento complexos que resultam da aplicação destes modelos.

O aspecto mais relevante incluído no modelo de programação matemática proposto para o problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples com postos paralelos e restrições de zona reside na possibilidade de o decisor poder controlar o processo de “paralelização” das estações, através da definição do tempo de tarefa mínimo requerido para que o posto de trabalho ao qual essa tarefa está afectada seja replicado. É ainda de salientar o facto de o modelo ter

por objectivos não só o de minimizar o número de postos de trabalho, como o de equilibrar as cargas de trabalho entre as várias estações.

A complexidade do modelo proposto, que possui um elevado número de variáveis e restrições, impossibilita a obtenção de soluções óptimas para problemas de grande dimensão em tempo útil, pelo que se desenvolveu uma heurística baseada no algoritmo de recristalização simulada para a obtenção de soluções aproximadas.

Neste trabalho apresenta-se ainda uma extensão ao modelo proposto, a qual permite a resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelo-misto. Este tipo de linhas procura responder a uma maior diversificação da procura por parte dos consumidores, tendo como consequência prática tornar cada vez mais difícil encontrar produtos que, isoladamente, justifiquem a implementação de linhas de montagem dedicadas. As linhas de modelo-misto surgem como resposta a esta alteração de comportamento dos consumidores, uma vez que permitem a montagem em simultâneo de vários produtos.

Esta extensão ao modelo proposto tem, para além do objectivo de minimizar o número de estações da linha, um outro, que consiste no equilíbrio das cargas de trabalho de cada modelo ao longo das várias estações e, dentro de cada estação, para os vários modelos. A heurística desenvolvida para a resolução de problemas de balanceamento de linhas de modelo-simples, serviu de base para o desenvolvimento de uma outra para linhas de modelo-misto.

As heurísticas propostas foram aplicadas a um conjunto de problemas representativos de uma gama alargada de situações reais e os resultados obtidos foram comparados com: i) as soluções óptimas obtidas pelo programa Cplex, para os problemas de menor dimensão e ii) um limite inferior para o problema, desenvolvido neste trabalho, que tem em conta as características específicas do problema. Conclui-se que o desempenho das heurísticas propostas é muito bom, não só pela qualidade das soluções obtidas, mas também pela rapidez com que essas soluções são geradas.

Para uma resposta efectiva das heurísticas aos problemas reais, é necessário que o processo de “paralelização” seja controlado correctamente pelo utilizador. Por outro lado, no caso das linhas de modelo-misto, a importância de objectivos como o equilíbrio das cargas de trabalho de cada modelo entre as várias estações e, dentro de

cada estação, para os vários modelos, pode variar consoante o utilizador ou a situação específica da linha de montagem. Assim, para um melhor aproveitamento das potencialidades das heurísticas, é fundamental a interacção com o agente de decisão, tanto para a definição correcta dos parâmetros de entrada, como para a escolha, de entre várias soluções apresentadas, da solução mais adequada ao sistema em causa.

5.2 Perspectivas de desenvolvimento futuro

O trabalho realizado nesta dissertação pode servir como ponto de partida para uma abordagem integrada ao problema de balanceamento de linhas de montagem, nomeadamente, através da incorporação dos modelos e heurísticas propostos num sistema de apoio à decisão.

O projecto de desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para o balanceamento de linhas de montagem está, na verdade, a ser iniciado e espera-se uma aplicação prática com sucesso numa empresa industrial.

Outros problemas relacionados com o balanceamento de linhas de montagem e que não foram abordados no trabalho descrito, serão objecto de trabalho futuro. Entre eles destacam-se:

- (i) o desenvolvimento de metodologias para a resolução do problema de balanceamento de linhas de montagem do tipo II, em que se pretende minimizar o tempo de ciclo para um dado número de estações;
- (ii) o estudo do problema de sequenciamento de modelos nas linhas de montagem de modelo-misto, muito importante para o desempenho deste tipo de linhas, especialmente em sistemas de produção “just-in-time”;
- (iii) o desenvolvimento de modelos de simulação para melhor compreender o funcionamento das linhas de montagem e avaliar o seu desempenho, podendo ser considerados tempos de processamento estocásticos.

Relativamente às técnicas e metodologias, prevê-se a utilização de software de simulação e a aplicação de meta-heurísticas, como a recristalização simulada, a pesquisa tabu e os algoritmos genéticos, tendo sempre como principal objectivo a flexibilidade dos modelos por forma a ser possível aplicá-los a problemas que reflectam a realidade industrial.

Referências bibliográficas

- Ahmadi, R. H., Dasu, S. e Tang, C. S. (1992). The Dynamic Line Allocation Problem. *Management Science*, 38, 1341-1353.
- Amen, M. (2000). An Exact Method for Cost Oriented Assembly Line Balancing. *International Journal of Production Economics*, 64, 187-195.
- Anderson, E. J. e Ferris, M. C. (1994). Genetic Algorithms for Combinatorial Optimization: The Assembly Line Balancing Problem. *ORSA Journal on Computing*, 6, 161-173.
- Arcus, A. L. (1966). COMSOAL: A Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines. *International Journal of Production Research*, 4, 259-277.
- Askin, R. G. e Zhou, M. (1997). A Parallel Station Heuristic for the Mixed-Model Production Line Balancing Problem. *International Journal of Production Research*, 35, 3095-3106.
- Bard, J. F. (1989). Assembly Line Balancing with Parallel Workstations and Dead Time. *International Journal of Production Research*, 27, 1005-1018.
- Bartholdi, J. J. (1993). Balancing Two-Sided Assembly Lines: a Case Study. *International Journal of Production Research*, 31, 2447-2461.
- Baybars, I. (1986a). A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *Management Science*, 32, 909-932.
- Baybars, I. (1986b). An Efficient Heuristic Method for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *International Journal of Production Research*, 24, 149-166.
- Buffa, E. S. e Sarin, R. K. (1987). *Modern Production/Operations Management*. New York: John Wiley & Sons.
- Buxey, G. M. (1974). Assembly Line Balancing with Multiple Stations. *Management Science*, 20, 1010-1021.
- Chakravarty, A. K. e Shtub, A. (1986). A Cost Minimization Procedure for Mixed-Model Production Lines with Normally Distributed Task Times. *European Journal of Operational Research*, 23, 25-36.

- Chiang, W.-C. (1998). The Application of a Tabu Search Metaheuristic to the Assembly Line Balancing Problem. *Annals of Operations Research*, 77, 209-227.
- Chow, W.-M. (1987). Buffer Capacity Analysis for Sequential Production Lines with Variable Process Times. *International Journal of Production Research*, 25, 1183-1196.
- Chow, W.-M. (1990). *Assembly Line Design: Methodology and Applications*. New York: Dekker.
- Daganzo, C. F. e Blumenfeld, D. E. (1994). Assembly System Design Principles and Tradeoffs. *International Journal of Production Research*, 32, 669-681.
- Deckro, R. F. (1989). Balancing Cycle Time and Workstations. *IIE Transactions*, 21, 106-111.
- Dimopoulos, C. e Zalzala, A. M. S. (2000). Recent Developments in Evolutionary Computation for Manufacturing Optimization: Problems, Solutions and Comparisons. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 4, 93-113.
- Driscoll, J. e Abdel-Shafi, A. A. (1985). A Simulation Approach to Evaluating Assembly Line Balancing Solutions. *International Journal of Production Research*, 23, 975-985.
- Erel, E. e Göcken, H. (1999). Shortest-Route Formulation of Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem. *European Journal of Operational Research* 116, 194-204.
- Erel, E. e Sarin, S. C. (1998). A Survey of the Assembly Line Balancing Procedures. *Production Planning and Control*, 9, 414-434.
- Faaland, B. H., Klastorin, T. D. e Schmitt, T. G. (1992). Assembly Line Balancing with Resource Dependent Task Times. *Decision Sciences*, 23, 343-364.
- Fokkert, J. I. e Kok, T. G. (1997). The Mixed and Multi Model Line Balancing Problem: a Comparison. *European Journal of Operational Research*, 100, 399-412.
- Garey, M. R. e Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-completeness*. San Francisco: W. H. Freeman.

- Ghosh, S. e Gagnon, R. J. (1989). A Comprehensive Literature Review and Analysis of the Design, Balancing and Scheduling of Assembly Systems. *International Journal of Production Research*, 27, 637-670.
- Globerson, S. e Tamir, A (1980). The Relationship between Job Design, Human Behaviour and System Response. *International Journal of Production Research*, 18, 391-400.
- Glover, F. (1989). Tabu Search – Part I. *ORSA Journal on Computing*, 1, 190-206.
- Glover, F. (1990). Tabu Search – Part II. *ORSA Journal on Computing*, 2, 4-32.
- Göcken, H. e Erel, E. (1997). A Goal Programming Approach to Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem. *International Journal of Production Economics*, 48, 177-185.
- Göcken, H. e Erel, E. (1998). Binary Integer Formulation for Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem. *Computers and Industrial Engineering*, 23, 451-461.
- Gunther, R.E., Johnson, G. D. e Peterson, R. S. (1983). Currently Practiced Formulations for the Assembly Line Balance Problem. *Journal of Operations Management*, 3, 209-221.
- Hackman, S. T., Magazine, M. J. e Wee, T. S. (1989). Fast, Effective Algorithms for Simple Assembly Line Balancing Problems. *Operations Research*, 37, 916-924.
- Heinrici, A. (1994). A Comparison between Simulated Annealing and Tabu Search with an Example from the Production Planning. In H. Dyckhoff, U. Derigs, M. Salomon e H. C. Tijms (Eds.), *Operations Research Proceedings 1993* (pp 498-503). Berlin: Springer, Berlin.
- Helgeson, W. B. e Birnie, D. P. (1961). Assembly Line Balancing using the Ranked Positional Technique. *Journal of Industrial Engineering*, 12, 394-398.
- Hoffmann, T. R. (1992). EUREKA: A Hybrid System for Assembly Line Balancing. *Management Science*, 38, 39-47.

- Johnson, R. V. (1983). A Branch and Bound Algorithm for Assembly Line Balancing Problems with Formulation Irregularities. *International Journal of Production Research*, 19, 277-287.
- Johnson, R. V. (1988). Optimally Balancing Large Assembly Lines with FABLE. *Management Science*, 34, 240-251.
- Kilbridge, M. D. e Wester, L. (1961). A Heuristic Method of Assembly Line Balancing. *Journal of Industrial Engineering*, 12, 292-298.
- Kim, Yeo Keun, Kim, Yeongho e Kim, Yong Ju (2000). Two-Sided Assembly Line Balancing: a Genetic Algorithm Approach. *Production Planning and Control*, 11, 44-53.
- Kirkpatrick S., Gelatt Jr., C. D. e Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220, 671-680.
- Lehman, M. (1969). On Criteria for Assigning Models to Assembly Lines. *International Journal of Production Research*, 7, 269-285.
- Leu, Y., Matheson, L. A. e Rees, L. P. (1994). Assembly Line Balancing Using Genetic Algorithms with Heuristic-Generated Initial Populations and Multiple Evaluation Criteria. *Decision Sciences*, 25, 581-606.
- Lima-Fernandes, C. J. e Groover, M. P. (1995). Mixed-Model Assembly Line Balancing and Sequencing: a Survey. *Engineering Design & Automation*, 1, 33-42.
- Lyu, J. J. (1997). A Single-Run Optimization Algorithm for Stochastic Assembly Line Balancing Problems. *Journal of Manufacturing Systems*, 16, 204-210.
- Malakooti, B. (1991). A Multiple Criteria Decision Making Approach for the Assembly Line Balancing Problem. *International Journal of Production Research*, 29, 1979-2001.
- Malakooti, B. (1994). Assembly Line Balancing with Buffers by Multiple Criteria Optimization. *International Journal of Production Research*, 32, 2159-2178.
- Matanachai, S. e Yano, C. A. (2001). Balancing Mixed-Model Assembly Lines to Reduce Workoverload. *IIE Transactions*, 33, 29-42.

- McMullen, P. R. e Frazier, G. V. (1997). A Heuristic for Solving Mixed-Model Line Balancing Problems with Stochastic Task Durations and Parallel Stations. *International Journal of Production Economics*, 51, 177-190.
- McMullen, P. R. e Frazier, G. V. (1998a). Using Simulated Annealing to solve a Multiobjective Line Balancing Problem with Parallel Workstations. *International Journal of Production Research*, 36, 2717-2741.
- McMullen, P. R. e Frazier, G. V. (1998b). Using Simulation and Data Envelopment Analysis to Compare Assembly Line Balancing Solutions. *Journal of Productivity Analysis*, 11, 149-168.
- Merengo, C., Nava, F. e Pozzetti, A. (1999). Balancing and Sequencing Manual Mixed-Model Assembly Lines. *International Journal of Production Research*, 37, 2835-2860.
- Michalewicz, Z. (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* (3ª ed.). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Moodie, C. L. e Young, H. H. (1965). A Heuristic Method of Assembly Line Balancing for Assumptions of Constant or Variable Work Element Times. *Journal of Industrial Engineering*, 16, 23-29.
- Nof, S. Y., Wilhelm, W. E. e Warnecke, H. (1997). *Industrial Assembly*. London: Chapman & Hall.
- Nourie, F. J. e Venta, E. R. (1991). Finding Optimal Line Balances with OptPack. *Operations Research Letters*, 10, 165-171.
- Oh, K. H. (1997). Expert Line Balancing System (ELBS). *Computers and Industrial Engineering*, 33, 303-306.
- Pastor, R. e Corominas, A. (1999). Assembly Line Balancing with Work Zone and Station Load Time Windows Constraints. *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning. Porto, Portugal July 1999*, 448-453.
- Petersen, C. (1993). A Tabu Search Procedure for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *Proceedings of the 1993 Decision Sciences Conference, Washington DC*, 1502-1504.

- Pinto, P. A., Dannenbring, D. G. e Khumawala, B. M. (1975). A Branch and Bound Algorithm for Assembly Line Balancing with Paralleling. *International Journal of Production Research*, 13, 183-196.
- Pinto, P. A., Dannenbring, D. G. e Khumawala, B. M. (1981). Branch and Bound and Heuristic Procedures for Assembly Line Balancing with Paralleling of Stations. *International Journal of Production Research*, 19, 565-576.
- Pirlot, M. (1996). General Local Search Methods. *European Journal of Operational Research*, 92, 493-511.
- Ponnambalam, S. G., Aravindan, P. e Naidu, G. M. (1999). A Comparative Evaluation of Assembly Line Balancing Heuristics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15, 577-586.
- Ponnambalam, S. G., Aravindan, P. e Naidu, G. M. (2000). A Multiobjective Genetic Algorithm for Solving Assembly Line Balancing Problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 297-302.
- Roy, R. e Allchurch, M. J. (1996). Development of a Knowledge-Based System for Balancing Complex Mixed Model Assembly Lines. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 9, 205-216.
- Sabuncuoglu, I., Erel, E. e Tanyer, M. (2000). Assembly Line Balancing Using Genetic Algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, 295-310.
- Salveson, M. E. (1955). The Assembly Line Balancing Problem. *Journal of Industrial Engineering*, 6, 18-25.
- Sarin, S., Erel, E. e Dar-El, E. M. (1999). A Methodology for Solving Single-Model, Stochastic Assembly Line Balancing Problems. *OMEGA*, 27, 525-535.
- Sarker, B. R. e Shantikumar, J. G. (1983). A Generalized Approach for Serial or Parallel Line Balancing. *International Journal of Production Research*, 21, 109-133.
- Schofield, N. A. (1979). Assembly Line Balancing and the Application of Computer Techniques. *Computers and Industrial Engineering*, 3, 53-69.
- Scholl, A. (1993). Data of Assembly Line Balancing Problems. <<http://www.bwl.tu-darmstadt.de/bwl/forsch/veroeff/sqbw/bwl93-16.htm>>.

- Scholl, A. (1999). *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Scholl, A. e Klein, R. (1997). SALOME: A Bidirectional Branch and Bound Procedure for Assembly Line Balancing. *INFORMS Journal on Computing*, 9, 319-334.
- Scholl, A. e Klein, R. (1999b). Balancing Assembly Lines Effectively – a Computational Comparison. *European Journal of Operational Research*, 114, 50-58.
- Scholl, A. e Voß, S. (1996). Simple Assembly Line Balancing – Heuristic Approaches. *Journal of Heuristics*, 2, 217-244.
- Shtub, A. e Dar-El, E. M. (1990). An Assembly Chart Oriented Assembly Line Balancing Approach. *International Journal of Production Research*, 28, 1137-1151.
- Sprecher, A. (1999). A Competitive Branch-and-Bound Algorithm for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *International Journal of Production Research*, 37, 1787-1816.
- Suresh, G. e Sahu, S. (1994). Stochastic Assembly Line Balancing using Simulated Annealing. *International Journal of Production Research*, 32, 1801-1810.
- Talbot, F. B., Patterson, J. H. e Gehrlein, W. V. (1986). A Comparative Evaluation of Heuristic Line Balancing Techniques. *Management Science*, 32, 430-454.
- Zhao, Z. Y. e Souza, R. (2000). Genetic Production Line-Balancing for the Hard Disk Drive Industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 297-302.

Apêndice A

Construção de um diagrama de precedências

Neste apêndice é ilustrada a construção de um diagrama de precedências, através de um exemplo adaptado de Buffa e Sarin (1987 pp. 662-664).

Observando a figura A.1, que representa os componentes necessários para montar um carrinho de brinquedo, podem identificar-se as restrições de precedência que têm que ser respeitadas para uma montagem correcta. Por exemplo, as rodas não podem ser montadas antes de os eixos estarem instalados.

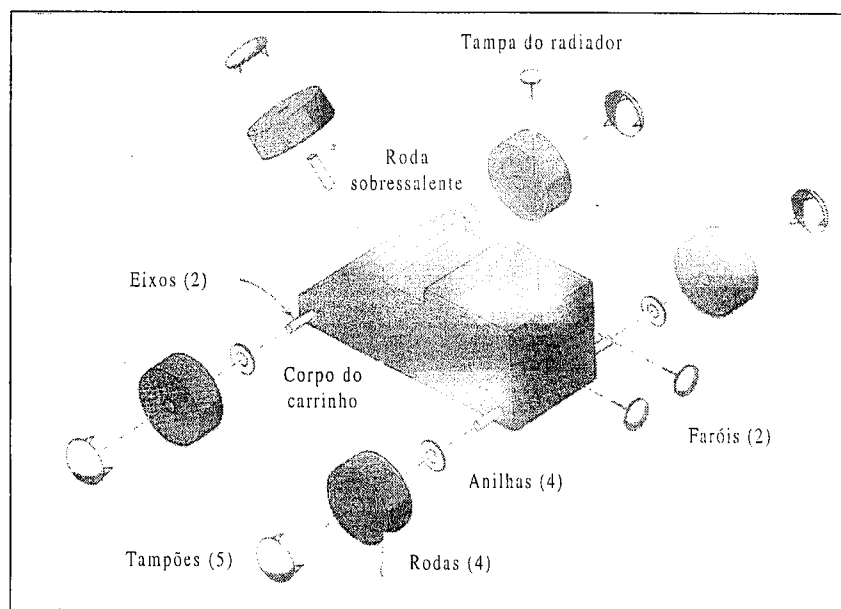


Figura A.1 – Componentes de um carrinho de brinquedo

Uma formalização das restrições de precedência pode ser feita através de uma tabela que descreve as tarefas de montagem e as respectivas tarefas precedentes, tal como é ilustrado na tabela A.1.

A partir desta informação é possível construir um diagrama de precedências. Identificando cada tarefa com um círculo numerado, inicia-se o diagrama com as tarefas que não têm precedentes. São, então, adicionados arcos que ligam cada tarefa às tarefas das quais é precedente até terem sido incluídas todas as tarefas da lista.

Tabela A.1 - Lista das tarefas necessárias para a montagem do carrinho de brinquedo.

Tarefa	Descrição	Tarefas precedentes
1	Posicionar o corpo do carrinho no tapete rolante	-
2	Instalar o farol direito	1
3	Instalar o farol esquerdo	1
4	Instalar a tampa do radiador	1
5	Instalar tampão na roda sobressalente	-
6	Instalar tampão na roda 1	-
7	Instalar tampão na roda 2	-
8	Instalar tampão na roda 3	-
9	Instalar tampão na roda 4	-
10	Colocar suporte da roda sobressalente na roda sobressalente	5
11	Colocar sub-montagem roda sobressalente-suporte no corpo do carrinho	1,10
12	Introduzir o eixo 1 na roda 1	6
13	Introduzir o eixo 2 na roda 3	8
14	Montar a anilha 1 na sub-montagem eixo1-roda1	12
15	Montar a anilha 3 na sub-montagem eixo2-roda3	13
16	Introduzir a sub-montagem eixo1-roda1-anilha1 no corpo do carrinho	1,14
17	Introduzir a sub-montagem eixo2-roda3-anilha3 no corpo do carrinho	1,15
18	Montar a anilha 2 no eixo 1	16
19	Montar a anilha4 no eixo 2	17
20	Montar a roda 2 no eixo 1	7,18
21	Montar a roda 4 no eixo 2	9,19
22	Dirigir o carrinho para fora do tapete rolante	2,3,4,11,20,21

O diagrama de precedências completo para o exemplo do carrinho de brinquedo é apresentado na figura A.2.

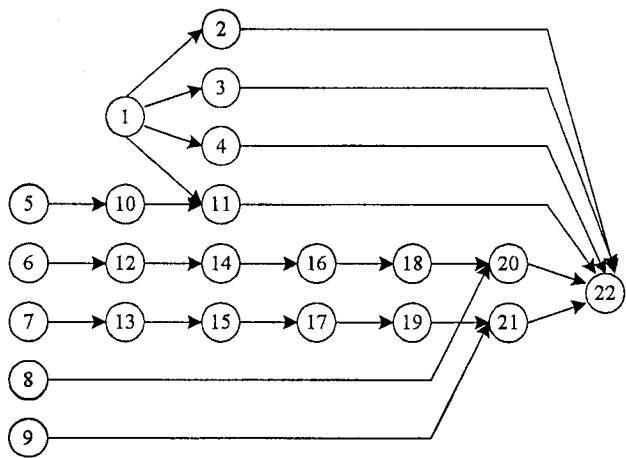


Figura A.2 - Diagrama de precedências para a montagem do carrinho de brinquedo.

Apêndice B

Gerador de Problemas

O gerador de problemas de balanceamento de linhas de montagem de modelo-simples e de modelo-misto foi desenvolvido e implementado em linguagem C e compreende duas fases: (i) a construção do diagrama de precedências, e (ii) a definição dos parâmetros relativos ao problema de balanceamento.

1. Construção do diagrama de precedências

1.1. Parâmetros definidos pelo utilizador

- Número de tarefas (no caso dos problemas de modelo misto corresponde ao número de tarefas do diagrama de precedências combinado), N .
- Número máximo de precedentes directos que cada tarefa pode ter, $MaxPrec$.
- Número máximo de sucessores para tarefas “soltas” (isto é, tarefas que na fase final do processo de construção do diagrama, não estão no último nível e não têm sucessores directos), $MaxSuc$.
- Probabilidade de um nível extremo (primeiro ou último) do diagrama de precedências aceitar tarefas durante a construção do diagrama, $ProbExt$.
- Probabilidade de um nível quase-extremo (segundo e penúltimo) do diagrama de precedências aceitar tarefas durante a construção do diagrama, $ProbQ$.
- Probabilidade de um nível intermédio do diagrama de precedências aceitar tarefas durante a construção do diagrama, $ProbInt$.

1.2. Parâmetros gerados a partir de distribuições de probabilidade

- Número de níveis do diagrama de precedências
$$\begin{aligned} & \text{se } N \leq 4, NumNiv \sim \text{Uniforme}(1, N) \\ & \text{senão } NumNiv \sim \text{Normal}(\mu = \text{int}(N/4); \sigma = 3). \end{aligned}$$
- Número de precedentes de cada tarefa, para tarefas de nível superior a 1
$$Tarefa \rightarrow NumPrec \sim \text{Uniforme}(1, MaxPrec).$$

- Número de sucessores de cada tarefa “solta”,

$$\text{Tarefa} \rightarrow \text{NumSuc} \sim \text{Uniforme}(1, \text{MaxSuc}).$$

1.3. Metodologia

- I. Afectar uma tarefa a cada nível.
- II. Distribuir as restantes tarefas pelos vários níveis, tendo em conta as diferentes probabilidades de aceitação (ProbExt, ProbQ e ProbInt).
- III. Numerar as tarefas, começando pelos níveis mais baixos, de modo que nenhuma tarefa esteja num nível superior a outra com número mais elevado.
- IV. Definir as tarefas precedentes de cada tarefa ($\text{Tarefa} \rightarrow \text{NumPrec}$), seleccionando tarefas do nível anterior.
- V. Completar o diagrama. Do ponto anterior podem resultar tarefas (denominadas tarefas “soltas”), que, não estando no último nível, não têm sucessores directos. São, então, seleccionados esses sucessores ($\text{Tarefa} \rightarrow \text{NumSuc}$) que correspondem a tarefas de níveis mais elevados.

2. Definição dos parâmetros do problema de balanceamento

2.1. Número de modelos

- Número máximo de modelos, MaxModel (definido pelo utilizador).
- Número de modelos, $M \sim \text{Uniforme}(1, \text{MaxModel}).$

Em alternativa ao pontos anteriores, o utilizador pode definir directamente o número de modelos.

2.2. Dados da procura

- Período de produção, PP – por defeito, o valor considerado é 480 u.t. (se a unidade de tempo considerada for o minuto, este período corresponde a um turno normal de produção).
- Procura de cada modelo para PP, $\text{Modelo} \rightarrow \text{Procura} \sim \text{Uniforme}(10, 200)$
 – estes são os valores utilizados por defeito, no entanto, podem ser alterados pelo utilizador. Por exemplo, na geração dos problemas de modelo-misto apresentados no ponto 4.4.3.2, os valores da procura dos diferentes modelos

foram manipulados por forma a que o tempo de ciclo da linha tivesse o valor 10.

2.3. Tempos de processamento das tarefas

Nas linhas de montagem de modelo-misto consideradas neste trabalho, os tempos de processamento das tarefas para os diferentes modelos são semelhantes entre si. Assim, sendo t_{im} o tempo de processamento da tarefa i para o modelo m ($i=1,\dots,N$; $m=1,\dots,M$) e C o tempo de ciclo da linha, a geração dos tempos de processamento das tarefas para os vários modelos considera os seguintes aspectos:

- (i) Uma determinada tarefa i
 - é realizada no primeiro modelo ($m=1$), tendo um tempo de processamento positivo ($t_{i1}>0$) que pode ser superior, igual ou inferior ao tempo de ciclo C ou
 - não é realizada para o primeiro modelo ($t_{i1}=0$).
- (ii) O tempo de processamento da tarefa i para os restantes modelos é
 - igual a t_{i1} ,
 - superior ou inferior a t_{i1} , dentro de limites pré-definidos $((1-\delta)t_{i1} \leq t_{im} \leq (1+\delta)t_{i1}, 0 \leq \delta \leq 1)$ ou
 - nulo ($t_{im}=0$).

Para a geração dos tempos de processamento das tarefas, são definidos vários parâmetros, cujos valores utilizados por defeito são apresentados entre parêntesis:

- α - probabilidade de o tempo de processamento de uma tarefa ser superior ao tempo de ciclo ($\alpha=0,85$);
- β, χ - valores definidos por forma a que $1-\alpha = \beta + \chi$ ($\beta=0,075, \chi=0,075$);
- δ_1 - variação percentual do tempo de processamento de uma tarefa relativamente ao tempo de ciclo ($\delta_1=0,5$);
- δ_2 - variação percentual do tempo de processamento de uma tarefa para um modelo relativamente aos outros modelos ($\delta_2=0,15$);
- ε - probabilidade de o tempo de processamento de uma tarefa para um modelo ser igual ao seu tempo para outro modelo ($\varepsilon=0,75$);
- ϕ, γ - valores definidos por forma a que $1-\varepsilon = \phi + \gamma$ ($\phi=0,075, \gamma=0,175$).

O procedimento para a geração dos tempos de processamento das tarefas para os vários modelos é o seguinte:

```

para (i=1 até N)
  m=1
  Gerar  $t_{im}$ , tal que:
     $p(t_{im} < C) = \alpha \wedge$ 
     $p(t_{im} = 0) = \beta \wedge$ 
     $p(C \leq t_{im} \leq (1+\delta_1)C) = \chi$ 
  para (m=2 até M)      /*apenas para os problemas de modelo-misto*/
    se para todos os modelos anteriores a tarefa i não é realizada então
      Gerar  $t_{im}$ , tal que:
         $p(t_{im} < C) = \alpha \wedge$ 
         $p(t_{im} = 0) = \beta \wedge$ 
         $p(C \leq t_{im} \leq (1+\delta_1)C) = \chi$ 
      senão
        Gerar  $t_{im}$ , tal que:
           $p(t_{im} = t_{i1}) = \varepsilon \wedge$ 
           $p(t_{im} = 0) = \phi \wedge$ 
           $p((1-\delta_2)t_{i1} \leq t_{im} \leq (1+\delta_2)t_{i1}) = \gamma$ 
      fim_se
    fim_para
  fim_para

```

2.4. Restrições de zona de incompatibilidade

- Número máximo de pares de tarefas incompatíveis, $\text{MaxZona} = \text{int}(1 + 0.1 * N)$.
- Número de pares de tarefas incompatíveis,

ParesZona $\sim$ Uniforme(0,MaxZona).

ERRATA

Pág. 4 4ª linha: Onde se lê “sobre seu o projecto” deve ler-se “sobre o seu projecto”.

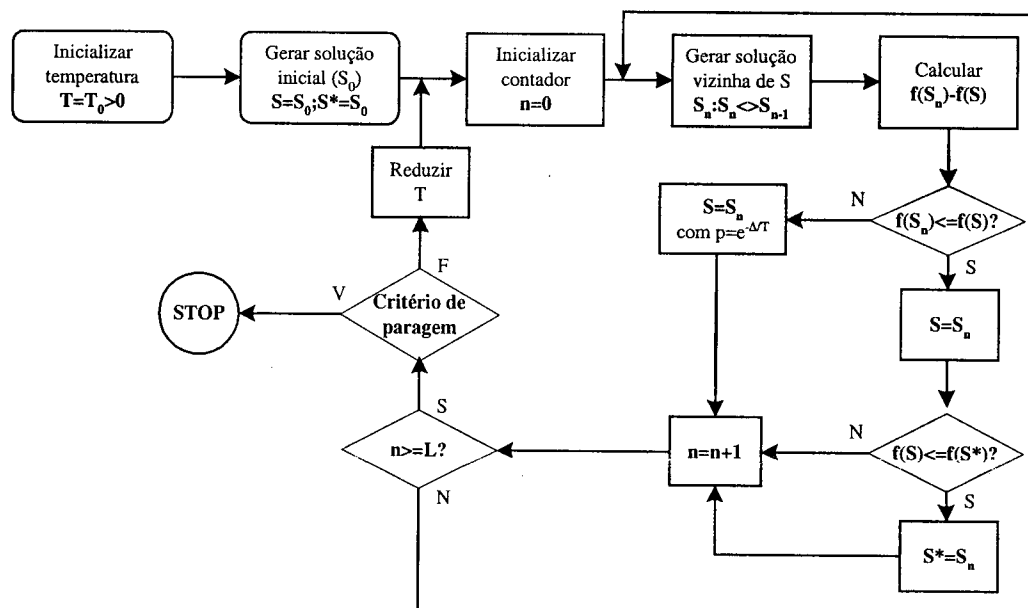
Pág. 20 1ª linha: Onde se lê “linhas de montagem” deve ler-se “linhas de montagem”.

Pág. 45 Último parágrafo, 8ª linha: Onde se lê “ $(\Delta=f(S_n)-f(S)\leq 0)$ ” deve ler-se “ $(f(S_n)-f(S)\leq 0)$ ”.

Pág. 45 Último parágrafo, última linha: Onde se lê “ $p=e^{-\Delta T}$ ” deve ler-se “ $p=e^{-\Delta T}$ ”, onde

$$\Delta = \frac{f(S_n) - f(S)}{f(S_n)} \times 100$$
.

Pág. 46 Correcção da Figura 4.3:



Pág. 48 Última linha: Onde se lê “dessa tarefa e de todos as” deve ler-se “dessa tarefa e de todas as”.

Pág. 68 Correcção do 3º termo da expressão (12):
$$\frac{M}{S'(M-1)} \sum_{k=1}^S \sum_{m=1}^M \left(\frac{q_m \cdot s_{km}}{S_k} - \frac{1}{M} \right)^2$$

Pág. 70 Substituição dos 2º, 3º e 4º parágrafos por: A formação das estações é feita de um modo semelhante ao utilizado para as linhas de modelo-simples, tendo em conta o tempo de ciclo da linha (C) e os tempos de processamento para os diferentes modelos. Se uma estação executa uma tarefa com tempo de processamento, para, pelo menos, um dos modelos, superior a MPT então a sua capacidade é C×MAXP, caso contrário é C.

Pág. 85 Referência Helgeson e Birnie (1961): Onde se lê “Ranked Positional Technique” deve ler-se “Ranked Positional Weight Technique”.

Pág. 94 Definição de α: Onde se lê “ser superior ao tempo de ciclo” deve ler-se “ser inferior ao tempo de ciclo”.