



**Ana Raquel Reis
Couto Xambre**

Planeamento de Sistemas de Produção Celulares



**Ana Raquel Reis
Couto Xambre**

Planeamento de Sistemas de Produção Celulares

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Pedro Manuel Moreira da Rocha Vilarinho, Professor Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho ao meu filho Guilherme! Por ele o terminei e, graças a ele, tudo tem um novo sentido!

o júri

presidente

Professor Doutor Artur Manuel Soares da Silva
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Jorge Manuel Pinho de Sousa
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof.^a Doutora Helena Maria Pereira Pinto Dourado Alvelos
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Rui Manuel Soucasaux Meneses e Sousa
Professor Catedrático da Faculdade de Economia e Gestão da Universidade Católica Portuguesa

Professor Doutor Joaquim José Borges Gouveia
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José António de Vasconcelos Ferreira
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Pedro Manuel Moreira da Rocha Vilarinho
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

agradecimentos

Quero agradecer a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho chegasse a bom termo. Nem sempre foi claro que isso viria a suceder! Preciso, porém, de fazer alguns agradecimentos mais especiais...

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Prof. Doutor Pedro Manuel Vilarinho, pelos seus conselhos, paciência e incentivo ao longo da realização deste trabalho e pelo seu cuidado na supervisão do mesmo.

Quero também agradecer aos anteriores responsáveis pelo Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial (DEGEI) da Universidade de Aveiro, nomeadamente ao Professor Doutor Joaquim Borges Gouveia, à Prof.^a Doutora Helena Alvelos, ao Prof. Doutor Joaquim da Costa Leite, ao Professor Doutor Henrique Diz e ao Prof. Doutor Rui Santiago, pelas condições que me proporcionaram e pelo apoio a este trabalho.

Agradeço ao Nelson toda a ajuda na programação.

A todos os colegas do DEGEI, e em particular aos elementos da COFA, agradeço profundamente o apoio e amizade ao longo de todos estes anos.

Alguns amigos não podem, contudo, deixar de ser mencionados...

Agradeço à Sofia a ajuda, a amizade e o incentivo numa fase em que este foi totalmente crucial!

À Leonor todo o apoio, amizade e imensa paciência nos maus momentos!

À Helena por ser uma amiga única, inestimável, sempre disposta a ouvir e sempre incansável na sua ajuda! Não teria conseguido terminar sem a sua amizade!

Finalmente, um agradecimento muito especial para toda a minha família! Muito obrigada por todo o amor que sempre me deram e saibam que são, para mim, as pessoas mais importantes do mundo!

palavras-chave

Células de fabrico, células de fabrico virtuais, implantações fabris, metaheurísticas.

resumo

Um sistema de produção celular (SPC) consiste numa forma de organização dos recursos produtivos sendo estes agrupados em células independentes, dedicadas ao processamento de famílias de componentes com necessidades de processamento similares.

Estes sistemas podem ser implementados de duas formas: fisicamente e logicamente. No primeiro caso as máquinas são dispostas em células de fabrico de maneira a melhorar a eficiência da implantação em termos de fluxo, no segundo caso as máquinas são afetadas a famílias de componentes, formando células virtuais não sendo, contudo, a sua localização física alterada. Neste trabalho são apresentados os problemas associados à definição de um sistema de produção celular, nomeadamente nas fases de planeamento, controlo e avaliação.

Devido à complexidade e ao impacto no desempenho da organização das decisões tomadas na fase de planeamento do sistema produtivo, os problemas inerentes a um projeto desta natureza são aprofundados, sendo apresentados algoritmos para a resolução dos mesmos.

Os procedimentos desenvolvidos tratam os seguintes problemas: (i) formação de células de fabrico, (ii) balanceamento de células de fabrico, (iii) formação de células virtuais numa implantação funcional, (iv) formação de células virtuais numa implantação distribuída, e (v) projeto da implantação fabril considerando secções com configuração geométrica fixa.

Dada a natureza combinatoria dos problemas considerados, foram utilizadas metaheurísticas na sua resolução.

A principal contribuição deste trabalho para a investigação no planeamento de sistemas de produção celulares resulta do facto de os modelos e heurísticas desenvolvidos incluírem um conjunto de aspetos de grande relevância para a sua aplicação a ambientes industriais, ultrapassando algumas das limitações práticas inerentes a outros procedimentos reportados na literatura relevante.

keywords

Manufacturing cells, virtual manufacturing cells, layouts, metaheuristics.

abstract

A cellular manufacturing system (CMS) is a type of production system that organizes the production resources into independent cells taking into account the similarities in the manufacturing sequences of the different parts assigned to those cells.

This type of production system can be implemented in two ways: physically or logically. In the first situation, machines are grouped into cells with the purpose of improving the layout efficiency in terms of flow. In the second option, machines are allocated to part families, originating virtual cells, but their physical location is not altered.

The first part of this work consists in a revision of the problems associated to a cellular manufacturing system, namely regarding its design, control and evaluation.

The problems inherent to the design phase are analyzed with greater detail due to their importance and impact on the system's performance.

Due to the complexity and significance of those problems, they were further analysed and algorithms were developed in order to contribute to their solution. The models address the following problems: (i) cell formation, (ii) production cell balancing, (iii) virtual cell formation in a functional layout, (iii) virtual cell formation in a distributed layout, and (v) facility layout considering objects with a fixed geometric shape.

Due to the combinatorial nature of the problems, metaheuristics were used in order to solve them.

The main contribution of this work, towards the furthering of investigation in cellular manufacturing systems design, derives from the development of models and heuristics that include a set of features that are highly relevant for its implementation in a real world industrial setting, overcoming, in this way, some of the practical limitations inherent to other known procedures.

Índice

1. Introdução Geral

1.1. Relevância do problema.....	3
1.2. Objetivo da tese	6
1.3. Estrutura da tese.....	9

2. Sistemas de Produção Celulares

2.1. Introdução	13
2.2. Caracterização dos sistemas de produção discreta	14
2.2.1. Sistemas organizados por posição fixa	14
2.2.2. Sistemas organizados por produto	14
2.2.3. Sistemas organizados por processo.....	16
2.2.4. Sistemas organizados por tecnologia de grupo.....	17
2.2.4.1. Sistemas de Produção Celulares.....	18
2.2.4.2. Sistemas de Produção Celulares Virtuais	20
2.3. Definição de Sistemas de Produção Celulares.....	23
2.3.1. Planeamento	23
2.3.2. Controlo	28
2.3.3. Avaliação.....	30
2.4. Definição de Sistemas de Produção Celulares Virtuais.....	32

3. Métodos para o Planeamento de Sistemas de Produção Celulares

3.1. Introdução	37
3.2. Afetação das operações.....	38
3.3. Formação das células de fabrico.....	39

3.3.1. Métodos baseados na matriz de incidência.....	40
3.3.1.1. Métodos matriciais e métodos de <i>clustering</i>	42
3.3.1.2. Outros métodos	44
3.3.2. Métodos baseados noutros tipos de dados	46
3.4. Duplicação de máquinas.....	48
3.5. Implantação intracelular e implantação intercelular.....	50
3.6. Planeamento de Sistemas de Produção Celulares Virtuais	53
4. Desenvolvimento de Algoritmos para a Formação de Células de Fabrico	
4.1. Introdução.....	59
4.2. Modelo de programação matemática.....	61
4.3. Algoritmo geral de arrefecimento simulado.....	64
4.4. Aplicação do algoritmo de arrefecimento simulado ao problema da formação de células de fabrico	68
4.4.1. Obtenção de uma solução inicial	68
4.4.2. Obtenção de soluções vizinhas.....	70
4.4.3. Parâmetros utilizados.....	71
4.4.4. Determinação das famílias de componentes.....	72
4.4.5. Ilustração numérica.....	72
4.4.6. Experiência computacional	78
4.5. Balanceamento de células de fabrico	81
4.5.1. Algoritmo para o balanceamento de células de fabrico	82
4.5.2. Ilustração numérica.....	85
4.5.3. Experiência computacional	87
4.6. Conclusões	89

5. Desenvolvimento de Algoritmos para a Formação de Células de Fabrico Virtuais

5.1. Introdução	93
5.2. Algoritmos genéticos	95
5.3. Algoritmo genético para o problema da formação de células de fabrico virtuais.....	98
5.3.1. Heurística	99
5.3.1.1. Codificação	99
5.3.1.2. Inicialização da população	99
5.3.1.3. Heurística <i>greedy</i> para a afetação das famílias de componentes às máquinas	100
5.3.1.4. Avaliação dos valores de <i>fitness</i>	101
5.3.1.5. Seleção por torneio.....	103
5.3.1.6. Substituição da população	103
5.3.1.7. Operadores de recombinação e mutação	104
5.3.1.8. Critério de paragem	105
5.3.2. Ilustração numérica	106
5.3.3. Melhoramento do coeficiente de semelhança.....	108
5.3.3.1. Ilustração numérica do coeficiente de semelhança.....	111
5.3.4. Experiência computacional	113
5.4. Algoritmo genético para o problema da formação de células de fabrico virtuais numa implantação distribuída.....	115
5.4.1. Experiência computacional	123
5.5. Conclusões	126

6. Desenvolvimento de um Algoritmo para o Projeto de Implantações Fabris em Sistemas de Produção Celulares

6.1. Introdução.....	131
6.2. Algoritmos genéticos para o problema das implantações fabris em sistemas de produção celulares.....	133
6.2.1. Aplicação do Algoritmo Genético.....	135
6.2.1.1. Codificação.....	136
6.2.1.2. População inicial.....	137
6.2.1.3. Heurística de colocação.....	137
6.2.1.4. Função de <i>fitness</i>	139
6.2.1.5. Seleção por torneio.....	139
6.2.1.6. Substituição da população.....	139
6.2.1.7. Operadores.....	140
6.2.1.8. Critério de paragem.....	141
6.2.2. Ilustração numérica.....	141
6.2.3. Experiência computacional.....	145
6.3. Conclusões.....	147
7. Conclusão	
7.1. Conclusões gerais	151
7.2. Perspetivas de desenvolvimento futuro	154
Referências Bibliográficas	157

Índice de Figuras

Figura 1.1 -	Problemas analisados	9
Figura 2.1 -	Sistema de produção organizado por produto	15
Figura 2.2 -	Sistema de produção organizado por processo	16
Figura 2.3 -	Sistema de produção celular	18
Figura 2.4 -	Utilização dos diferentes tipos de sistema de produção discreta - volume versus variedade	19
Figura 2.5 -	Sistema de produção celular virtual	21
Figura 2.6 -	Problemas associados ao planeamento de um sistema de produção celular	24
Figura 3.1 -	Exemplo de uma matriz de incidência máquinas-componentes na forma diagonal por blocos (MDB)	41
Figura 4.1 -	Curva de temperatura de um processo de arrefecimento	65
Figura 4.2 -	Pseudo-código do algoritmo geral de arrefecimento simulado .	65
Figura 4.3 -	Implantação inicial simplificada.....	79
Figura 4.4 -	Implantação gerada.....	80
Figura 4.5 -	Diagrama de precedências	85
Figura 4.6 -	Representação da solução inicial	86
Figura 4.7 -	Gráfico de convergência do algoritmo	88
Figura 4.8 -	Possível configuração da célula.....	90
Figura 5.1 -	Exemplo de um indivíduo e solução correspondente	99
Figura 5.2 -	Procedimento de inicialização da população	100
Figura 5.3 -	Seleção por torneio.....	103

Figura 5.4 -	Recombinação dos indivíduos.....	104
Figura 5.5 -	Operador de recombinação.....	105
Figura 5.6 -	População inicial (dimensão P=5) e descodificação.....	107
Figura 5.7 -	Gráfico de convergência do procedimento.....	114
Figura 5.8 -	Sistema de produção celular virtual numa implantação distribuída.....	115
Figura 5.9 -	Procedimento do algoritmo genético.....	118
Figura 5.10 -	Gráfico de convergência do procedimento.....	124
Figura 6.1 -	Representação da sequência de colocação.....	136
Figura 6.2 -	Procedimento de geração da população inicial.....	137
Figura 6.3 -	Secções a colocar.....	138
Figura 6.4 -	Oito possibilidades de colocação da nova secção.....	138
Figura 6.5 -	Procedimento de seleção.....	139
Figura 6.6 -	Procedimento de recombinação.....	140
Figura 6.7 -	Operador de recombinação.....	141
Figura 6.8 -	Número de viagens efetuadas entre as células i e j para todos os componentes k.....	142
Figura 6.9 -	Indivíduos iniciais.....	143
Figura 6.10 -	Exemplo da implantação.....	143
Figura 6.11 -	Matriz de distâncias (d_{ij}).....	143
Figura 6.12 -	Recombinação de indivíduos.....	144
Figura 6.13 -	Indivíduo após mutação e implantação resultante.....	144
Figura 6.14 -	Gráfico de convergência do procedimento.....	146

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Métodos de resolução do problema da formação das células de fabrico.....	45
Tabela 4.1 - Tipos de máquinas e taxas de utilização das operações	72
Tabela 4.2 - Matriz de fluxo entre operações.....	73
Tabela 4.3 - Afetação das operações	74
Tabela 4.4 - Matriz de fluxo entre máquinas.....	74
Tabela 4.5 - Fluxo médio para cada máquina não afetada (primeira iteração)	75
Tabela 4.6 - Fluxo médio para cada máquina não afetada (segunda iteração)	76
Tabela 4.7 - Composição das células.....	76
Tabela 4.8 - Matriz de fluxo entre operações para a solução inicial na forma MDB.....	77
Tabela 4.9 - Matriz de fluxo entre máquinas na forma MDB	78
Tabela 4.10 - Informação sobre as operações consideradas no exemplo numérico.....	85
Tabela 4.11 - Solução inicial para o problema de balanceamento.....	86
Tabela 4.12 - Resultados da experiência computacional.....	87
Tabela 5.1 - Dados de processamento dos componentes.....	106
Tabela 5.2 - Dados de processamento das operações.....	106
Tabela 5.3 - Matriz de semelhanças entre componentes (s_{pq})	106
Tabela 5.4 - Taxa de utilização dos equipamentos por família	108
Tabela 5.5 - Taxa total de utilização dos equipamentos por família.....	108

Tabela 5.6 -	Sequências de processamento dos componentes a, b e c.....	112
Tabela 5.7 -	Parâmetros do coeficiente.....	112
Tabela 5.8 -	Matriz dos coeficientes de semelhança.....	112
Tabela 5.9 -	Resultados da experiência computacional	113
Tabela 5.10 -	Resultados da experiência computacional	123
Tabela 6.1 -	Dados geométricos das células.....	142
Tabela 6.2 -	Resultados da experiência computacional	145

1

Introdução Geral

Conteúdo

- Relevância do problema
- Objetivo da tese
- Estrutura da tese

1.1. Relevância do problema

No contexto atual, as empresas industriais para se manterem competitivas nos mercados mundiais têm vindo a alargar a gama de produtos que oferecem, em resposta à procura, por parte dos consumidores, de produtos personalizados, com elevados níveis de qualidade e de baixo custo. Os sistemas tradicionais de produção em massa, que permitem a obtenção de economias de escala, têm vindo a ser substituídos por sistemas mais flexíveis que permitem acomodar uma gama diversificada de produtos, mantendo os custos de produção baixos.

Tradicionalmente, em ambientes de produção cujo objetivo é o de produzir uma pequena gama de produtos em elevadas quantidades opta-se por organizar os recursos produtivos em linhas de fabrico dedicadas à produção em exclusivo de um único produto (ou de variantes de um único produto). Neste tipo de sistemas de produção, organizados por produto, a flexibilidade para alargar a gama de componentes fabricados é limitada, mas o custo unitário de produção é relativamente reduzido (Stevenson, 2011; Nahmias, 2008).

Já em ambientes de produção, cujo objetivo é o de produzir uma gama alargada de produtos em lotes de dimensão reduzida, os recursos produtivos são, normalmente, agrupados, de acordo com a sua funcionalidade, em departamentos. Neste tipo de organização dos sistemas de produção, designada por processo, os lotes dos diferentes componentes têm de percorrer os diferentes departamentos de acordo com a respetiva sequência de processamento (Stevenson, 2011; Nahmias, 2008). Desta forma a flexibilidade é elevada, mas o custo unitário de produção é relativamente elevado. Singh e Rajamani (2011) estimam que somente cerca de 5% do tempo total que os componentes passam no sistema é utilizado em operações que acrescentam valor (tipicamente, operações de processamento) e os restantes 95% são consumidos em operações de transporte, armazenamento ou espera.

A tendência atual dos mercados, caracterizada pela procura de produtos personalizados, com elevados níveis de qualidade e de baixo custo, tem levado os fabricantes a adotar de forma crescente os princípios *Lean*, procurando deste modo reduzir os seus custos operacionais e melhorar a produtividade.

Os sistemas de produção *Lean* têm por base os princípios do Sistema de Produção Toyota (*Toyota Production System* – TPS) desenvolvido nesta empresa japonesa, tendo

sido o termo *Lean*, primeiramente, referido por Krafcik (1988) e posteriormente difundido através da obra de Womack *et al.* (1990). Este conjunto de princípios apostam na eliminação sistemática de desperdícios, através da utilização de um conjunto de métodos e ferramentas que ajudam a melhorar o desempenho do sistema produtivo, permitindo o foco nas atividades que acrescentam valor, na perspetiva do consumidor (Shahin e Janatyan; 2010, Deif, 2012).

Os sistemas de produção celulares (SPC), em que os recursos produtivos são agrupados em células de fabrico que incluem os equipamentos requeridos para produzir uma família de componentes com requisitos de processamento semelhantes, surgem, neste âmbito, como uma forma mais eficiente de organização dos recursos contribuindo, desta forma, para a redução de desperdícios e facilitando a aplicação dos princípios *Lean* (Black e Hunter, 2003; Shahin e Janatyan, 2010; Deif, 2012).

Os sistemas de produção celulares conseguem, deste modo, combinar as vantagens da organização por processo - nomeadamente a flexibilidade em acomodar uma elevada gama de produtos - com vantagens da organização por produto - nomeadamente tempos de fluxo e níveis de existências reduzidos (Burbidge, 1992).

No caso de ambientes de produção em que a gama de produtos é extremamente dinâmica, uma nova forma de organização dos recursos produtivos, designada por células virtuais, tem sido sugerida na literatura (Drolet *et al.*, 1996; Saad *et al.*, 2002; Baykasoğlu, 2003; Kesen *et al.*, 2009; Khilwani *et al.*, 2011). Nos sistemas de produção organizados em células virtuais os equipamentos são fisicamente agrupados em departamentos de acordo com a sua funcionalidade, tal como nos sistemas de produção organizados por processo, mas durante um determinado período de tempo, correspondente ao horizonte temporal em que é fabricada uma determinada gama de produtos, são criadas células conceptuais nas quais os equipamentos são afetados à produção de uma família de componentes. Este tipo de sistema de produção (que doravante será sempre referenciado com recurso ao termo virtual para que possa ser distinguido dos sistemas de produção celulares tradicionais) permite obter algumas das vantagens dos sistemas de produção celulares, sem a necessidade de se redesenharem as células de fabrico sempre que a gama de produtos é substancialmente alterada.

Neste contexto, o planeamento eficiente dos sistemas de produção celulares (convencionais ou virtuais) é um aspeto crucial para a melhor utilização dos recursos produtivos. Neste trabalho são propostas novas abordagens para alguns dos problemas

relacionados com o planeamento de sistemas de produção celulares, com o intuito de contribuir para um estudo mais aprofundado dos aspetos relevantes de cada um, procurando manter uma perspetiva sobre as implicações que a implementação das soluções obtidas pode ter no desempenho de uma unidade industrial.

1.2. Objetivo da tese

A organização dos recursos utilizados num sistema produtivo é determinante para o desempenho do mesmo pois condiciona a eficiência com que estes podem ser utilizados. Em ambientes de produção discreta, em que se fabricam produtos individualizados, as formas mais tradicionais de organização do sistema produtivo são (i) por produto ou (ii) por processo, explicadas anteriormente.

No primeiro caso agrupam-se os recursos necessários (equipamentos, ferramentas, pessoas) de forma a ficarem dedicados à produção em massa de um único produto ou suas variantes (uma linha de montagem é um exemplo típico). Nos sistemas organizados por processo os equipamentos são agrupados de acordo com as suas funcionalidades, tendo os produtos que percorrer as diferentes secções de acordo com a respetiva sequência produtiva (Stevenson, 2011; Nahmias, 2008).

Em meados do século passado surgiu o conceito de sistemas de produção celulares ou células de fabrico. Estes resultam da aplicação da filosofia de tecnologia de grupo (conceito desenvolvido por Mitrofanov, 1966), a qual explora as semelhanças entre os atributos (por exemplo, características físicas ou sequências de processamento) de produtos, de componentes e de montagens, para simplificar diferentes processos de negócio como, por exemplo, o projeto e a produção. A aplicação do paradigma subjacente à tecnologia de grupo a uma unidade industrial resulta então na adoção de sistemas de produção celulares (SPC), no âmbito dos quais os recursos produtivos são divididos em células constituídas por grupos de máquinas (famílias de máquinas), dedicados à produção, em exclusivo, de um conjunto de componentes (família de componentes) com atributos considerados idênticos, ou seja, que apresentam semelhanças no seu processo de fabrico ou nas suas características físicas.

A aplicação dos princípios da filosofia *Lean*, que assenta na identificação e eliminação das atividades da empresa que não acrescentam valor do ponto de vista do cliente (eliminação de desperdícios), tem vindo a proliferar nas empresas. Adicionalmente, o conceito de célula de fabrico, que é apontado como um dos blocos da implementação dessa filosofia (Black e Hunter, 2003), pois permite reduzir desperdícios (e.g. tempos de preparação, de espera, de transporte), tem levado a um crescente interesse por parte das empresas na forma como devem pensar, organizar e redesenhar os seus sistemas produtivos.

Deste modo, os SPC têm vindo a ganhar relevância, no contexto competitivo que caracteriza atualmente a procura de bens nos mercados mundiais, pois, em situações de produção por lotes de pequena dimensão, permitem combinar os baixos custos que se obtêm em sistemas de produção por produto, com a flexibilidade dos sistemas de produção por processo.

Mais recentemente, na década de 80 do século passado, surgiu o conceito de sistemas de produção celulares virtuais (SPCV) ou células virtuais (McLean *et al.*, 1982). Estes sistemas diferem dos sistemas celulares tradicionais por não contemplarem o agrupamento físico dos recursos (equipamentos) mas apenas a sua junção conceptual.

O planeamento de SPC (tradicionais ou virtuais) envolve um processo de decisão de grande complexidade cuja resolução passa, no caso mais geral, pela sua decomposição num conjunto de problemas tais como a afetação das operações às máquinas, a formação de células de fabrico, a definição da implantação, entre outros.

O objetivo principal deste trabalho é o de caracterizar as condicionantes associadas à resolução de alguns dos problemas associados ao planeamento de SPC e SPCV, nomeadamente os da formação de células de fabrico tradicionais e virtuais e o da definição da implantação intra e intercelular, e propor novas abordagens para a resolução desses problemas.

Desta forma foram desenvolvidos cinco algoritmos, que procuram incorporar vários dos condicionalismos associados à resolução destes problemas, nomeadamente:

- (i) Problema da formação de células de fabrico – é proposto um algoritmo que tem por base o procedimento de arrefecimento simulado e que procura definir a constituição das células de fabrico (em termos de equipamentos e componentes), por forma a minimizar o nível de fluxo intercelular. O algoritmo usa uma matriz de fluxo entre operações e considera, conjuntamente, o problema da afetação das operações aos equipamentos, assumindo que podem existir várias unidades do mesmo tipo de equipamento.
- (ii) Problema de balanceamento de uma célula de fabrico – este algoritmo também utiliza o arrefecimento simulado e procura determinar uma solução de balanceamento da célula, assumindo que esta pode ser encarada como uma linha de produção assíncrona em que o fluxo não é, necessariamente, unidirecional e os recursos podem ser de diferentes tipos (equipamentos e

trabalhadores). A função objetivo utilizada procura reduzir o número de recursos utilizados e analisa o equilíbrio da distribuição das cargas entre eles.

- (iii) Problema da formação de células de fabrico virtuais numa implantação organizada por processo – para este problema foi utilizado um procedimento que teve por base os algoritmos genéticos. O algoritmo tem por objetivo definir a constituição das famílias de componentes considerando, para isso, a semelhança entre componentes (e dissemelhança entre famílias) e o equilíbrio na distribuição do trabalho pelos recursos disponíveis. Para analisar a semelhança entre componentes foi desenvolvido um coeficiente que procura avaliar o número de operações em comum, entre dois componentes, assim como a ordem pela qual essas operações são efetuadas.
- (iv) Problema da formação de células de fabrico virtuais numa implantação distribuída – para este problema expandiu-se o algoritmo anterior de maneira a contemplar o facto dos equipamentos se encontrarem distribuídos pelo espaço fabril, e não agrupados em departamentos funcionais. Deste modo, foram incluídos, na função objetivo, dois novos termos que avaliam as distâncias a percorrer pelos diferentes componentes e também a complexidade do fluxo por eles gerado.
- (v) Problema da definição da implantação fabril considerando secções com configuração geométrica fixa – para este problema a principal questão é a de definir a implantação, tendo como objetivo a minimização dos custos de transporte de materiais, considerando que os recursos a posicionar têm configurações já definidas. Como o procedimento desenvolvido é dirigido à definição quer da implantação intracelular (em que se pretende definir a localização de equipamentos dentro de cada célula), quer intercelular (em que se pretende definir a localização de células com uma configuração já definida), é essencial considerar as configurações das secções a implantar como sendo fixas.

No desenvolvimento destes algoritmos houve sempre a preocupação de incorporar as questões práticas que, do ponto de vista industrial, são essenciais ao planeamento adequado de um SPC ou SPCV. Procurou-se analisar diferentes problemas relacionados com o planeamento destes sistemas, contribuindo assim para um melhor entendimento das condicionantes de cada um.

1.3. Estrutura da tese

O desenvolvimento deste trabalho levou a um estudo que partiu de conceitos mais gerais para algumas questões mais particulares, o que se refletiu na estrutura do presente trabalho.

Assim, no capítulo 2 são caracterizados, de uma forma genérica, os diferentes tipos de organização dos sistemas de produção com o objetivo de enquadrar os sistemas de produção celulares, objeto desta tese. Ainda neste capítulo descrevem-se os aspetos mais relevantes de cada uma das fases de desenvolvimento de um sistema de produção celular: planeamento, controlo e avaliação.

No capítulo 3 são apresentados os problemas subjacentes ao planeamento de sistemas de produção celulares e apresentam-se as principais técnicas utilizadas na sua resolução, destacando-se algumas das limitações que esses métodos apresentam face às necessidades reais de uma unidade industrial que pretenda planear e implementar um sistema de produção celular.

De seguida é apresentada a parte central do trabalho desenvolvido que consistiu na análise de um conjunto de problemas relacionados com o planeamento de SPC e SPCV e no conseqüente desenvolvimento de algoritmos para a resolução desses problemas.

A figura 1.1 procura mostrar os problemas que foram abordados nos três capítulos centrais (capítulos 4, 5 e 6) e a relação entre eles.

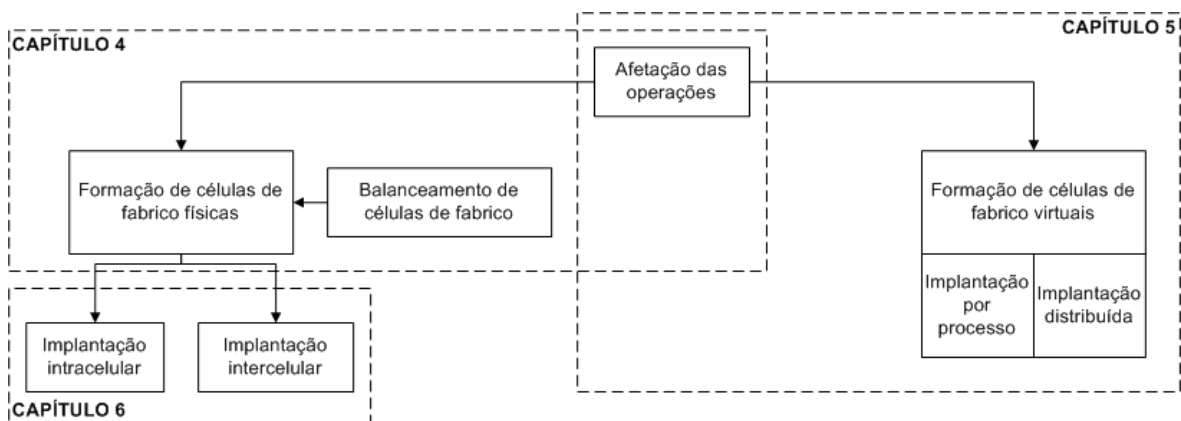


Figura 1.1 - Problemas analisados

Assim, no capítulo 4, é apresentado o problema e a heurística desenvolvida para o problema de formação de células de fabrico tradicionais. Duas particularidades do algoritmo são o facto de este considerar também a afetação das operações aos equipamentos, e admitir a existência de múltiplas unidades do mesmo tipo de equipamento.

Ainda no capítulo 4 é apresentado o problema do balanceamento de uma célula de fabrico tradicional, fazendo uma analogia com uma linha de produção assíncrona, sendo especificado um algoritmo para este problema. Este problema é resolvido admitindo que é conhecida a família de componentes a processar na célula e considera a existência de tarefas que, para serem realizadas, necessitam de recursos diferentes (equipamentos e/ou trabalhadores).

No capítulo 5 tratam-se as questões inerentes ao planeamento de sistemas de produção celulares virtuais. Foram desenvolvidos dois algoritmos que procuram determinar a constituição das famílias de componentes avaliando a semelhanças entre as respetivas sequências de fabrico e fazendo a afetação destas aos equipamentos disponíveis. Foram consideradas duas situações distintas, de acordo com a organização física dos equipamentos (implantação por processo ou implantação distribuída), tendo sido desenvolvidas funções de *fitness* que permitem avaliar adequadamente a semelhança entre os componentes de uma família, a distribuição equilibrada da carga pelos recursos disponíveis e, no caso de uma implantação distribuída, a distância a percorrer pelos componentes assim como a simplificação do fluxo.

Por fim, no capítulo 6, é abordado o problema da definição da configuração de uma implantação fabril considerando secções com configuração geométrica fixa. O procedimento pode ser aplicado tanto à definição da implantação intracelular, por forma a definir a localização relativa das máquinas que constituem a célula, como à definição da implantação intercelular, em que se define a localização relativa das células na área fabril.

No último capítulo, capítulo 7, são apresentadas, as conclusões finais do trabalho desenvolvido, propondo-se também algumas indicações para o desenvolvimento de investigação futura na área do planeamento de sistemas de produção celulares.

2

Sistemas de Produção Celulares

Conteúdo

- Introdução
- Caracterização dos sistemas de produção discreta
- Definição de Sistemas de Produção Celulares
- Definição de Sistemas de Produção Celulares Virtuais

2.1. Introdução

Um sistema de produção agrega o conjunto de recursos (equipamentos, pessoas e capital) responsáveis pela transformação de uma série de entradas (e.g., matérias primas) em diferentes produtos finais, nomeadamente bens e/ou serviços (Buffa e Sarin, 1987). Neste trabalho tratam-se, fundamentalmente, questões que surgem em sistemas de produção que originam bens físicos e, deste modo, os métodos desenvolvidos tiveram por base a forma de funcionamento de ambientes industriais. Estes métodos podem, contudo, futuramente ser adaptados e transpostos para empresas de fornecimento de serviços.

Quando se analisam os sistemas de produção industriais verifica-se que as suas diferentes características podem dar origem a diversas formas de os classificar. No contexto deste trabalho interessa, em primeiro lugar, classificar os sistemas de produção de acordo com a natureza do fluxo produtivo: quando através deste se gera um produto a granel o sistema de produção diz-se contínuo, quando se geram componentes diferenciados o sistema diz-se discreto.

Nos sistemas de produção contínuos, os meios de transporte de materiais e a própria implantação fabril estão claramente associados à natureza do processo e às sequências de operações nele envolvidas.

Os sistemas de produção discreta, contudo, podem ser classificados de acordo com a forma como os processos produtivos são agrupados fisicamente e, conseqüentemente, com o tipo de implantação fabril resultante. Assim, podem-se distinguir quatro tipos mais comuns de organização: por posição fixa (do produto), por processo, por produto e por tecnologia de grupo (ou sistemas de produção celulares).

Neste capítulo caracterizam-se cada um destes tipos de organização dos sistemas de produção discreta, com o objetivo de enquadrar os sistemas de produção celular, que são o foco deste trabalho.

Os aspetos mais relevantes de cada uma das fases de desenvolvimento de um sistema de produção celular, nomeadamente o planeamento, o controlo e a avaliação, são também descritos neste capítulo.

2.2. Caracterização dos sistemas de produção discreta

No sentido de contextualizar adequadamente o conceito de Sistemas de Produção Celulares (na sua forma tradicional ou na forma virtual) é necessário, primeiramente, apresentar os tipos mais comuns de sistemas de produção discreta. Nas secções seguintes são descritos esses sistemas, culminando com uma explicação sobre os sistemas organizados por tecnologia de grupo, que incluem os SPC tradicionais e os SPC virtuais.

2.2.1. Sistemas organizados por posição fixa

Nos sistemas organizados por posição fixa, o produto permanece numa determinada localização e são os recursos produtivos que se deslocam até ao mesmo para o processarem. Este tipo de sistema é utilizado na produção de produtos de grandes dimensões, nos quais ou a posição está predeterminada (por exemplo, na construção de edifícios) ou os custos associados à movimentação do produto entre os diferentes postos de trabalho são proibitivos (por exemplo, na montagem de aviões).

Normalmente, neste tipo de sistema produtivo os lotes de fabrico são de pequena dimensão ou mesmo unitários.

Nas secções seguintes descrevem-se os tipos de sistemas de produção que se podem encontrar quando é necessário lidar com lotes de maiores dimensões.

2.2.2. Sistemas organizados por produto

Nos sistemas organizados por produto os recursos são dispostos em linhas de produção independentes, sendo os equipamentos de cada linha dedicados à produção de um único componente (ou produto), ou de variantes desse componente (ou produto). No caso do mesmo processo ser requerido por componentes diferentes, é necessária a duplicação do equipamento associado, em cada uma das linhas que o utilizam. Um exemplo de uma implantação fabril deste tipo de sistema é ilustrado na figura 2.1, que mostra os postos de trabalho colocados de forma sequencial, tendo o produto que percorrer todos os postos, de forma unidirecional, de maneira a que sejam efetuadas todas as operações de montagem requeridas para completar o produto.

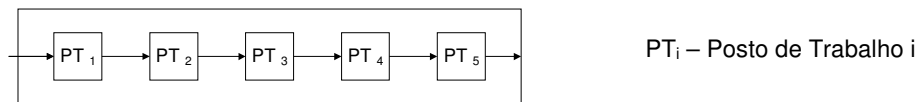


Figura 2.1 - Sistema de produção organizado por produto

Este tipo de sistemas é essencialmente utilizado quando a gama de produtos a fabricar é reduzida e os volumes de produção são elevados, nomeadamente no caso de unidades industriais que utilizam linhas de montagem (por exemplo, nas indústrias automóvel e de eletrónica de consumo).

Este tipo de organização dos recursos produtivos caracteriza-se por:

- baixos custos de transportes de materiais, uma vez que a sua movimentação só é efetuada entre postos de trabalho adjacentes;
- ciclos de produção reduzidos, uma vez que o fluxo de produção é praticamente contínuo;
- reduzidas existências de produtos em curso de fabrico, em virtude dos ciclos de produção serem curtos;
- simplicidade do sistema de controlo da produção, porque o fluxo de produção é linear;
- reduzida necessidade de qualificação da mão-de-obra, uma vez que cada trabalhador é afetado a um posto de trabalho específico e, conseqüentemente, realiza um conjunto limitado de tarefas ou operações;
- baixa motivação dos trabalhadores, devido à repetitividade das tarefas que executam;
- reduzida flexibilidade do sistema, uma vez que não é fácil a sua adaptação para a produção de novos produtos, conduzindo a um elevado risco das linhas se tornarem obsoletas, linhas essas que, quando projetadas e implementadas obrigam a grandes investimentos (Srisansanee, 1997).

O principal problema associado ao planeamento dos sistemas organizados por produto é a divisão das tarefas entre os diferentes postos de trabalho de forma a obter-se um fluxo contínuo, ou seja, tempos de processamento igualmente distribuídos entre os diferentes

postos de trabalho (este problema é usualmente designado por balanceamento de linhas de montagem). Assim, este tipo de sistema de produção é fundamentalmente associado a linhas de montagem, onde o trabalho é essencialmente manual, sendo essencial a correta divisão das tarefas pelos postos de trabalho (Vilarinho e Simaria, 2002).

2.2.3. Sistemas organizados por processo

Nos sistemas organizados por processo os equipamentos são agrupados em departamentos de acordo com a sua funcionalidade (por exemplo, numa indústria metalo-mecânica, os tornos mecânicos são colocados numa determinada zona, as fresadoras noutra, etc). Assim, cada componente terá que visitar os diversos departamentos de acordo com as máquinas que necessita para completar a respetiva sequência de operações. Um exemplo de uma implantação fabril deste tipo de sistema é ilustrado na figura 2.2, na qual se mostram dois produtos cuja produção implica que os componentes que os integram sejam transportados entre os diferentes departamentos que contêm os equipamentos necessários à sua produção.

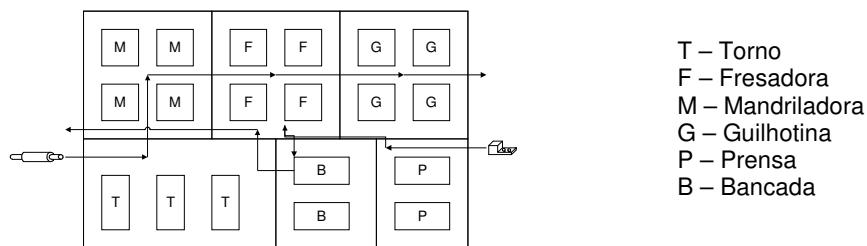


Figura 2.2 - Sistema de produção organizado por processo

Este tipo de organização dos recursos produtivos é, tradicionalmente, utilizado em indústrias que fabricam uma grande diversidade de produtos em lotes de pequenas dimensões e caracteriza-se por:

- elevada flexibilidade, pois é simples incluir novos componentes, ou alterar um já existente, bastando, para tal definir ou readaptar a sequência de fabrico deste;
- elevada taxa de utilização dos equipamentos e da mão-de-obra, dado que podem processar diferentes tipos de componentes;

- dificuldade acrescida em controlar a produção, pois o número de diferentes tipos de componentes em processamento, em cada instante de tempo, é, normalmente, muito elevado;
- maiores ciclos de produção, do que nos sistemas organizados por produto, em virtude do aumento dos tempos de transporte, de preparação de máquinas e de espera pela disponibilidade de equipamento;
- elevadas existências em curso de fabrico, como consequência dos ciclos de produção longos;
- elevados custos de transporte de materiais, dada a dispersão dos equipamentos pela área fabril e o número de diferentes percursos ser praticamente igual ao número de diferentes componentes a processar;
- maior facilidade em motivar a mão-de-obra, do que nos sistemas organizados por produto, uma vez que apesar de a mão-de-obra ser especializada numa determinada função, a variedade de tarefas realizadas é elevada.

A definição deste tipo de organização passa, essencialmente, pela definição da implantação fabril, nomeadamente a especificação da localização relativa dos diferentes departamentos na área fabril (Phillips, 1997).

2.2.4. Sistemas organizados por tecnologia de grupo

Mitrofanov (1966) apresentou, em meados do século passado, o conceito de tecnologia de grupo. Este tem por base a ideia de que os diferentes componentes ou produtos fabricados numa unidade industrial podem ter semelhanças que os permite agrupar em famílias. Deste modo, é possível tratar de uma forma comum todos os elementos de uma família, seja na fase de conceção do produto seja na sua fabricação. A aplicação desta lógica à organização de um sistema produtivo resulta num sistema de produção celular (SPC) que pode ser implementado fisicamente (agrupando-se em células os equipamentos requeridos para o processamento de cada família de componentes) ou apenas virtualmente (em que os equipamentos são afetados a famílias de componentes mas não são agrupados em células físicas).

Nas próximas secções explicam-se as principais características destes dois tipos de sistemas de produção celulares: tradicional e virtual.

2.2.4.1 Sistemas de Produção Celulares

Nos sistemas de produção celulares os equipamentos são agrupados em células de fabrico, sendo cada uma delas dedicada a um conjunto de componentes com características de processamento semelhantes (família de componentes). Na figura 2.3 apresenta-se um exemplo de um sistema de produção celular. Neste exemplo surgem duas células de fabrico constituídas por equipamentos com funcionalidades diferentes (torno, fresadora, ...) estando afetadas a cada célula uma família de componentes semelhantes.

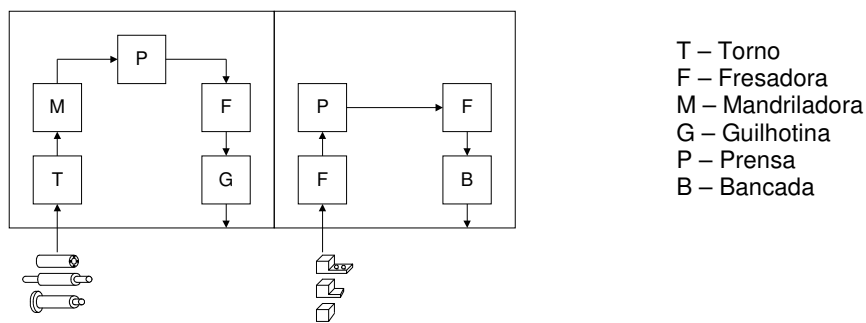


Figura 2.3 - Sistema de produção celular

Este tipo de sistema de produção alia as vantagens de uma configuração por produto, à flexibilidade e à motivação da mão-de-obra de um sistema organizado por processo. Com a definição de células dedicadas à produção de uma família de componentes, conseguem-se sistemas semelhantes a linhas de produção (em que os equipamentos estão fisicamente próximos) o que permite obter as vantagens que advêm de um sistema organizado por produto. Por outro lado, não se perde toda a flexibilidade associada aos sistemas organizados por processo, uma vez que cada célula contém um conjunto de equipamentos funcionalmente diversos, o que permite incluir na mesma célula uma grande variedade de novos componentes, bastando para tal que a sua sequência de processamento implique a utilização dos equipamentos existentes nessa célula, não sendo necessário que sigam a mesma sequência de fabrico de outros componentes dessa família ou mesmo que usem todos os equipamentos incluídos na célula.

A utilização de sistemas de produção celulares facilita ainda a aplicação de técnicas e ferramentas *Lean*, ao associar cada trabalhador a um conjunto restrito e integrado de máquinas, componentes e tarefas (Black e Hunter, 2003).

Outras vantagens deste tipo de sistema passam por um controlo da qualidade facilitado, uma vez que os componentes são totalmente processados numa célula e um aumento do espaço disponível, graças à diminuição das existências em curso de fabrico (Singh e Rajamani, 2011). Os sistemas de produção baseados em tecnologia de grupo têm, também, um impacto importante nas outras funções da empresa. Por exemplo, o projeto de novos produtos é realizado tendo em atenção a informação de processo das famílias de componentes já existentes no sistema de produção e a contabilidade de custos é estruturada de acordo com as células existentes (Singh e Rajamani, 2011). Do ponto de vista dos recursos humanos, a organização por células de fabrico fomenta o trabalho em equipa e potencia a descentralização da gestão da organização (*empowerment*).

Tendo em conta os fatores volume de produção e variedade da gama de produtos, a utilização de sistemas de produção celulares é particularmente indicada para valores intermédios de cada um destes fatores, entre situações de grande diversidade de produtos, em que a flexibilidade de um sistema organizado por processo é essencial, e situações em que se pretende produzir grandes volumes de uma pequena variedade de produtos, recorrendo-se, para tal, a sistemas organizados por produto (ver figura 2.4).

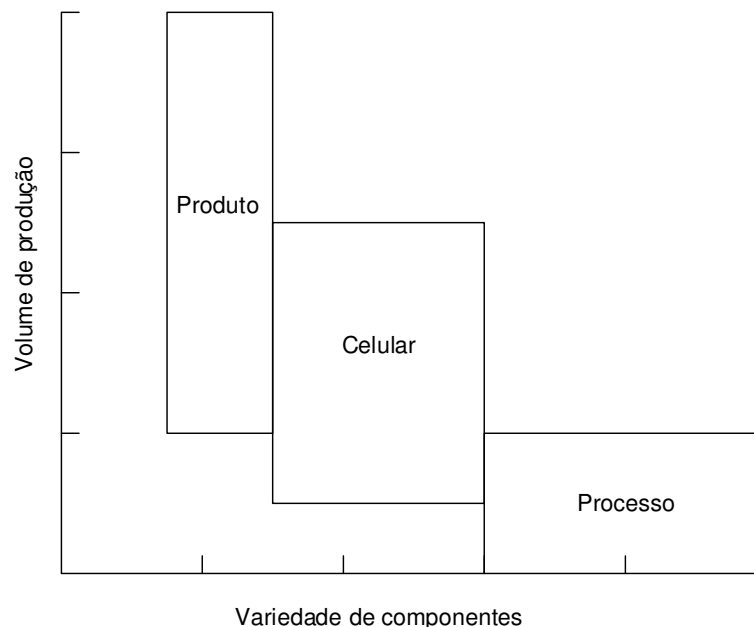


Figura 2.4 - Utilização dos diferentes tipos de sistema de produção discreta - volume versus variedade (adaptado de Askin e Standridge, 1993)

Na literatura são vários os estudos comparativos entre os sistemas de produção celulares e os sistemas organizados por produto e por processo. Sengupta (1997) comparou os sistemas organizados por tecnologia de grupo com os organizados por produto, tendo concluído que as vantagens dos sistemas de produção celulares dependem do tipo de produto que domina a procura e do tipo de fatores de processamento requeridos, nomeadamente ao nível da especialização dos operadores. Wemmerlöv e Johnson (1997), Johnson (1998) e Marsh *et al.* (1999) analisaram um conjunto de casos reais de empresas que migraram de uma organização por processo para sistemas de produção celulares, onde avaliaram o impacto da utilização de sistemas de produção celulares no desempenho da empresa. Concluíram que os SPC têm, na maior parte dos casos, um impacto positivo no desempenho dos sistemas produtivos, existindo, contudo, por parte de algumas empresas, dificuldades no projeto das células e consequentemente na obtenção dos benefícios da sua implementação. Vários estudos, baseados em simulação (Flynn e Jacobs, 1986; Morris e Tersine, 1994; Farrington e Nazemetz, 1998; Canel *et al.*, 2005; Djassemi, 2005), também efetuaram a comparação entre o desempenho de sistemas organizados por processo e de sistemas de produção celulares, utilizando diferentes medidas de desempenho como as existências em curso de fabrico, a dimensão das filas de espera, o tempo médio de espera, o tempo médio de fluxo, o tempo médio de preparação, a utilização dos equipamentos e da mão-de-obra, os tempos de atraso médios e as distâncias médias percorridas por encomenda. Nestes trabalhos verifica-se que não há um consenso sobre qual o sistema que apresenta melhor desempenho, estando as conclusões dos estudos muito dependentes das medidas usadas e dos pressupostos assumidos (Agarwal e Sarkis, 1998). Apontam, contudo, genericamente, para a menor flexibilidade dos SPC sendo que Djassemi (2005), ao analisar os fatores que influenciam essa flexibilidade, concluiu que a utilização de uma força de trabalho flexível contribui para melhorar o desempenho dos SPC.

2.2.4.2. Sistemas de Produção Celulares Virtuais

Os sistemas de produção celulares surgiram como uma alternativa para a organização dos sistemas de produção em ambientes fabris de produção por lotes, apresentando diversas vantagens relativamente aos sistemas de produção por processo, como já foi referido anteriormente. Apesar das vantagens inerentes à utilização de sistemas de produção celulares, alguns estudos apontam para um conjunto de limitações destes sistemas, nomeadamente, um elevado investimento em equipamento, uma baixa taxa de

utilização da capacidade instalada e uma baixa flexibilidade na seleção de rotas de fabrico alternativas devido à existência de equipamento dedicado (Mertins *et al.*, 2000, Kesen *et al.*, 2009). Por outro lado, os sistemas de produção celulares conseguem obter elevados níveis de eficiência em termos dos tempos de preparação dos equipamentos mesmo quando é necessário acomodar frequentes mudanças dos componentes a fabricar (Kannan, 1997).

Em ambientes industriais caracterizados pela produção em lotes de dimensão reduzida de uma grande variedade de componentes com ciclos de vida relativamente curtos, os sistemas de produção celulares veem a sua eficiência reduzida, dada a necessidade de se proceder frequentemente ao redesenho das células e da implantação fabril.

Neste contexto surgiu uma extensão do conceito de células de fabrico: os sistemas de produção celulares virtuais. O conceito de células virtuais (McLean *et al.*, 1982; Drolet *et al.*, 1989) foi desenvolvido no sentido aumentar a flexibilidade na produção de gamas de componentes com ciclos de vida reduzidos, mantendo a eficiência dos tempos de preparação dos equipamentos.

Neste tipo de sistema os equipamentos mantêm-se agrupados em departamentos de acordo com a sua funcionalidade mas são afetados a famílias específicas de componentes (ver figura 2.5).

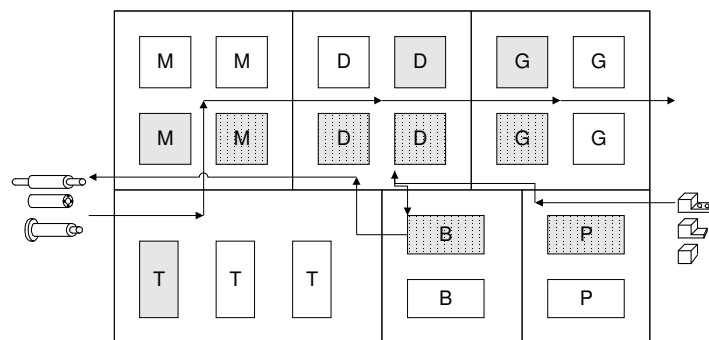


Figura 2.5 - Sistema de produção celular virtual

As células virtuais são grupos meramente conceptuais de recursos produtivos. As famílias de componentes são afetadas a esses grupos durante um determinado período de tempo, mas a localização física dos recursos não é alterada. Esses equipamentos permanecem organizados em departamentos funcionais dado que os sistemas de

produção celulares virtuais se baseiam numa organização por processo. Após esse período as células podem ser redefinidas se as alterações na procura a isso obrigarem.

2.3. Definição de Sistemas de Produção Celulares

Como qualquer outro sistema de produção os SPC apresentam diversos problemas que se tornam evidentes quando se pretende desenhar, operar ou avaliar o sistema. Neste trabalho procurou-se abordar os problemas que surgem na fase de planeamento mas, no sentido de melhor enquadrar os SPC e evidenciar as suas particularidades, nos pontos seguintes serão também abordadas as questões relacionadas com o controlo e avaliação dos mesmos.

2.3.1. Planeamento

A fase de projeto de qualquer tipo de sistema de produção deve ser encarada com particular cuidado, por duas ordens de razão principais. Em primeiro lugar, a configuração definida para o sistema de produção irá determinar o seu desempenho futuro. Em segundo lugar, as decisões tomadas nesta fase são por natureza estratégicas, no sentido em que têm um impacto a longo prazo: uma vez implementadas, a sua modificação obriga normalmente a elevados investimentos, que decorrem tanto da mudança de localização de equipamentos como da perda de tempo de produção.

No caso particular dos sistemas de produção celulares, qualquer um dos aspetos atrás mencionados tem uma importância acrescida dado o investimento suplementar que comportam relativamente aos sistemas de produção por processo e dada a necessidade de serem suficientemente flexíveis por forma a poderem facilmente acomodar novos componentes, sem que para tal seja necessário modificar ou criar frequentemente as células de fabrico.

O projeto de sistemas de produção celulares pode ser decomposto num conjunto de problemas, esquematicamente apresentados na figura 2.6.

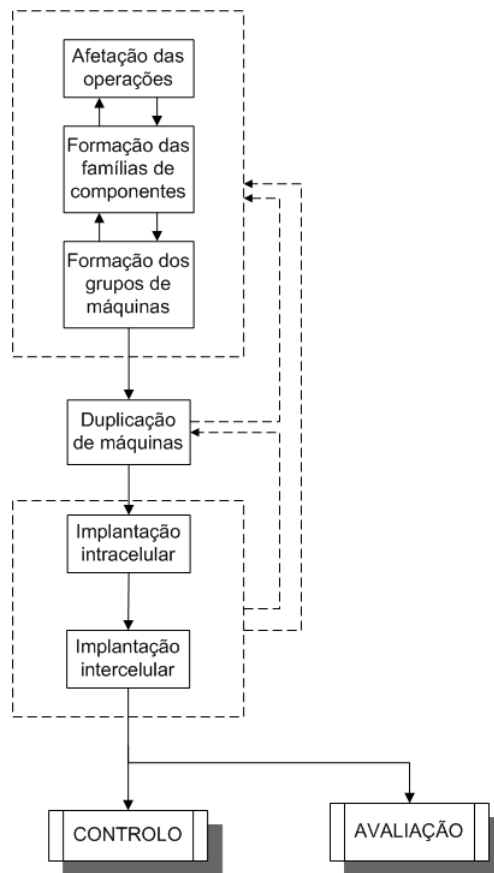


Figura 2.6 - Problemas associados ao planeamento de um sistema de produção celular

Esses problemas são de seguida detalhados para que sejam mais perceptíveis as suas características e a interligação entre os mesmos:

- (i) Afetação das operações às máquinas: num sistema de produção celular podem existir conjuntos de máquinas de um mesmo tipo, pelo que, para os componentes que utilizam esse tipo de máquina, é possível definir uma série de rotas alternativas em função da máquina específica utilizada para o processamento de cada uma das suas operações. Assim, e uma vez que a definição da composição das células de fabrico pressupõe o conhecimento da máquina específica em que cada operação é efetuada, a resolução do problema da afetação das operações às máquinas deverá preceder, ou ser efetuada simultaneamente, à do problema da formação de células de fabrico.
- (ii) Formação das células de fabrico: este problema inclui a definição das famílias de componentes e dos grupos de máquinas. A sua interação é evidente pois

para saber quais as máquinas a incluir numa célula é necessário conhecer quais os componentes a processar. Por outro lado, para que um componente seja incluído numa célula é necessário que esta contenha as máquinas necessárias ao seu processamento. O problema de formação das células de fabrico surge assim subdividido em dois subproblemas que podem ser tratados de uma forma isolada ou conjuntamente. Adicionalmente, quando existem várias máquinas do mesmo tipo, a sua distribuição pelas diferentes células pressupõe que se sabe quais as operações, efetuadas sobre os diferentes componentes, que são processadas em cada unidade de cada tipo de equipamento, sendo, deste modo, essencial efetuar a afetação das operações antes de definir a constituição das células.

- (iii) Duplicação de máquinas: as máquinas que processam componentes afetados a diferentes famílias de componentes e que, por isso, geram fluxo intercelular, podem ser duplicadas e colocadas nas células correspondentes àquelas diferentes famílias de componentes, de forma a eliminar os fluxos intercelulares. No entanto, este procedimento só é justificável nos casos em que os custos associados à duplicação de máquinas não ultrapassem aqueles que advêm da existência do correspondente fluxo intercelular. A decisão de duplicar uma ou mais máquinas obriga a rever a afetação de operações a máquinas e, conseqüentemente, a formação de células. A decisão de duplicação das máquinas é feita com base na redução de custos conseguida através da eliminação dos fluxos intercelulares face aos custos fixos e variáveis associados a essas máquinas. Mais uma vez, esta decisão influencia os subproblemas anteriores podendo levar a alterações quer na afetação das operações quer na constituição das famílias de componentes e máquinas.
- (iv) Implantação intracelular: consiste na definição da localização relativa das máquinas dentro de cada célula, dependendo, naturalmente, da constituição destas em termos de equipamentos e das sequências de fabrico dos diferentes componentes incluídos nessa célula.
- (v) Implantação intercelular: consiste na determinação da melhor localização relativa das células na área fabril, de forma a minimizar o custo de transporte de materiais entre células.

Dado que, em sistemas de produção celulares, se pretende minimizar os fluxos intercelulares, quer em termos de quantidades, quer em termos de distâncias, as implantações resultantes da resolução dos subproblemas relativos à implantação podem ser utilizadas para redefinir a constituição das células (problema (ii)). Por outro lado, não é possível determinar nem a implantação intercelular (problema (v)) nem a implantação intracelular (problema (iv)) se não for conhecida, à partida, a constituição das células (problema (ii)).

Como se pode verificar, a interação entre estes problemas é bastante relevante, contudo a sua resolução é, tradicionalmente, sequencial e não simultânea, como seria conveniente (Arvindeh e Irani, 1994; Raminfar *et al.*, 2012). A complexidade de cada um destes problemas é, por si só, bastante elevada o que dificulta a sua resolução, mesmo isolada, tornando virtualmente impossível a sua modelização e resolução conjunta.

No entanto, verifica-se que a maioria dos autores procura tratar mais do que um destes subproblemas simultaneamente. Assim, por exemplo, a formação das famílias dos componentes e dos grupos de máquinas são, muitas vezes, abordadas em conjunto, assim como os problemas das implantações, quer intracelular quer intercelular, que são, tradicionalmente, considerados conjuntamente. Estes problemas serão abordados com maior profundidade no próximo capítulo, onde serão discutidos os métodos e técnicas usados para a resolução dos problemas associados à fase de planeamento de um sistema de produção celular.

Num número significativo de situações reais, em particular naquelas que correspondem à mudança de uma implantação fabril por processo para um sistema de produção celular, as empresas resolvem o problema da dificuldade em eliminar os fluxos intercelulares adotando sistemas híbridos que combinam células de fabrico com secções organizadas por processo e/ou produto.

De acordo com Burbidge (1992) todos os sistemas de produção organizados por processo podem ser convertidos em sistemas de produção celulares com um fluxo intercelular mínimo, através de uma análise adequada dos fluxos (*Production Flow Analysis* - PFA). Na prática, a validade desta afirmação é questionável, uma vez que a maioria das empresas, quando adota a utilização de células de fabrico, recorre a implantações híbridas onde, conjuntamente com as células de fabrico, permanecem secções organizadas por processo e/ou por produto. Esta situação deve-se, essencialmente, a questões como:

- a existência de máquinas gargalo, que intervêm no processamento de uma parte considerável dos componentes e cujo custo ou dimensão física impede a sua multiplicação e correspondente afetação às diferentes células de fabrico;
- a necessidade de limitar a dimensão das células de fabrico, por forma a assegurar que as vantagens a elas associadas não se perdem.

Deste modo, o resultado da adoção de sistemas de produção celulares origina, geralmente, um conjunto de células de fabrico, não totalmente autónomas, por onde são processados os diversos componentes, que coexistem com departamentos ou máquinas dispostas isoladamente.

Outra situação que se encontra com frequência é a da utilização de células de fabrico dedicadas à produção de componentes, as quais convivem com linhas de montagem dos produtos finais resultantes da montagem dos componentes produzidos nas células de fabrico ou em sectores organizados por processo.

A definição de sistemas de produção híbridos não tem sido muito tratada no passado tendo, por exemplo, Harhalakis *et al.* (1996) proposto uma abordagem para a construção deste tipo de sistema. Irani *et al.* (1992) propõem uma outra abordagem, baseada na teoria de grafos, que, apesar de ter como objetivo a resolução do problema de formação de células de fabrico, ao definir a constituição das células de fabrico, limita as duplicações de máquinas e agrupa as máquinas partilhadas por mais do que uma célula em departamentos funcionais, o que acaba por originar uma implantação híbrida.

Mais recentemente este tipo de implantação começou a ser mais estudado (Feyzioglu e Pierrval, 2009; Durmusoglu e Satoglu, 2011), sendo apresentado como uma forma de ultrapassar a menor flexibilidade dos SPC, em ambientes de grande volatilidade da procura.

Tendo sido analisados os problemas ao nível do planeamento, são apresentadas, nos pontos seguintes as questões relacionadas com o controlo diário de um SPC e com a avaliação do desempenho do mesmo.

2.3.2. Controlo

O sequenciamento da produção e a afetação da mão-de-obra são questões que surgem em qualquer tipo de organização industrial, porém, nas indústrias com sistemas de produção celulares, estes problemas assumem alguns aspetos característicos dado que as células, para poderem atingir o seu potencial, devem ter algum grau de autonomia.

A referida autonomia deverá traduzir-se quer ao nível do processamento dos componentes quer ao nível da mão-de-obra afetada à célula. É necessário que os planeadores das células tenham a possibilidade de definir os níveis de produção e a afetação da mão-de-obra de acordo com a respetiva capacidade sem, contudo, ignorar as necessidades globais da empresa e as variações da procura. Daqui resultam três problemas específicos relativos ao controlo de sistemas de produção celulares, nomeadamente:

- o carregamento das células de fabrico;
- o sequenciamento da produção;
- a afetação da mão-de-obra.

O carregamento das células de fabrico consiste em determinar em que célula e por que ordem os produtos deverão ser processados. Este problema envolve três etapas: (i) seleção do produto, (ii) seleção da célula e (iii) determinação da ordem de afetação dos produtos às células (Süer *et al.*, 1999). Essa questão tem sido tratada em diversos trabalhos, normalmente numa perspetiva operacional. Alguns autores apresentam modelos com o objetivo de minimizar custos variáveis de produção (Akturk e Wilson, 1998; Akturk 2011). Noutros trabalhos são analisadas e comparadas diversas regras de carregamento (Süer *et al.*, 1999) recorrendo-se, por vezes, à simulação para efetuar essa comparação (Renna e Ambrico, 2011). Já, por exemplo, Lozano *et al.* (1999) tratam este problema conjuntamente com o problema de formação de células de fabrico, mas do ponto de vista do planeamento do sistema.

Por outro lado, o problema do sequenciamento envolve a calendarização das operações numa célula, após a afetação de um produto. Este problema engloba a determinação do instante de tempo em que se iniciam e terminam as diversas operações e do tamanho dos lotes de processamento e dos lotes de transferência.

Relativamente a este problema existem trabalhos que apresentam novas regras de

sequenciamento (Chen e Lin, 1999), que recorrem à simulação para comparar diversas regras de prioridade (Iyer e Askin, 1998) ou, mais recentemente formalizam o problema com base em modelos matemáticos recorrendo a metaheurísticas para obtenção de soluções (Venkataramanah, 2008; Wang *et al.*, 2010). Esta questão é, por vezes, tratada conjuntamente com o problema do carregamento (Süer *et al.*, 1999; Akturk 2011).

O problema de afetação da mão-de-obra passa pela definição de quantos operadores são necessários para realizar as tarefas e que tarefas cada um vai efetuar. Relativamente a esta questão existem técnicas heurísticas para a afetação dos operadores a células com máquinas operadas manualmente (Vembu e Srinivasan, 1997) podendo, contudo, ser utilizadas técnicas de otimização como é o caso do trabalho apresentado por Süer e Bera (1998) em que estes autores propõem modelos matemáticos para a afetação dos operadores e dos produtos às células existentes permitindo, inclusive, a divisão dos lotes de produção. Norman *et al.* (2002) também recorrem a um modelo de programação matemática, como forma de resolverem este problema, considerando que os trabalhadores têm diferentes capacidades técnicas, podendo estas ser melhoradas através de formação mas com custos acrescidos.

Outros autores propõem a utilização de simulação como forma de avaliar diferentes soluções para a afetação dos trabalhadores (McDonald *et al.*, 2009) e também para testar quantos equipamentos um trabalhador pode operar sem que a taxa de utilização dos equipamentos se reduza substancialmente (Prombanpong e Seenpipat, 2011).

Um outro especto relacionado com a afetação de mão-de-obra a células de fabrico tem a ver com o impacto da utilização de células e, conseqüentemente, de equipas de trabalho flexíveis na melhoria da produtividade da empresa (Sobhanallahi e Shayan, 1998; Djassemi, 2005; McDonald *et al.*, 2009).

Ainda no âmbito do controlo de sistemas de produção celulares surgem, por vezes, outros trabalhos com objetivos específicos, como a análise do problema da divisão equilibrada da carga de trabalho entre as diversas células de produção (Gung e Steudel, 1999) ou o estudo da relação entre a melhoria da qualidade e os sistemas de produção celulares (Kleiner *et al.*, 1996) sendo, mais uma vez, a simulação utilizada para avaliar as economias ao nível da qualidade neste tipo de sistema de produção (Clark e Tannock, 1999).

2.3.3. Avaliação

A avaliação de um sistema de produção celular passa por diversos aspetos tais como: (i) a validação da constituição das células, (ii) a avaliação de desempenho e alteração da implantação existente e (iii) o impacto no sistema de produção das alterações na procura e da introdução de novos produtos.

No meio industrial são a avaliação da procura esperada e as perspetivas de crescimento da procura de um determinado componente que levam à aquisição de novos equipamentos e até à criação de células específicas para a produção do componente em questão. Um estudo comparativo entre o volume de produção que irá ser gerado por esse componente, os fluxos que essa produção irá gerar, quer em termos de quantidades quer em termos de distâncias, e os custos de adquirir e manter uma ou mais máquinas novas pode levar à decisão de criar novas células.

Mais uma vez se verifica que o fator determinante, quer para a criação, quer para a remodelação das células de fabrico, é o fluxo intercelular gerado pelos componentes.

De forma resumida verifica-se que, basicamente, a avaliação que é feita numa empresa com um sistema celular abrange parâmetros como:

- o nível de existências de produtos em curso de fabrico;
- o tempo de fluxo dos diferentes produtos;
- o custo de transporte de materiais;
- o nível de satisfação das datas de entrega das encomendas.

De entre estes diversos indicadores, ressalta-se que o impulsionador de mudanças estruturais do sistema é, na maioria dos casos, o custo associado ao transporte de materiais entre células, podendo, naturalmente, esses custos dependerem, não só do sistema de transporte utilizado, mas principalmente das quantidades transportadas e das distâncias percorridas.

Ao nível industrial, as alterações na organização do sistema produtivo são levadas a cabo com base nestes indicadores e mediante as perspetivas de aceitação, pelo mercado, quer dos produtos existentes quer de novos produtos. Essas mudanças são efetuadas, geralmente, por tentativa e erro. Também na literatura se encontram estudos que incidem sobre a avaliação de sistemas de produção celular, sendo de destacar, de

entre as técnicas mais utilizadas, a simulação que, para além de permitir avaliar este tipo de sistemas, permite compará-los com a organização tradicional por processo (Shafer e Meredith, 1993; Canel *et al.*, 2005; Djassemi, 2005) e avaliar o impacto da introdução de novos produtos no sistema.

Além da simulação, outros investigadores têm tentado resolver esta questão da introdução de novos produtos, respetiva afetação a uma família de componentes e impacto na implantação fabril recorrendo a técnicas como a afetação dinâmica de peças (Seifoddini e Djassemi, 1996a) e modelos matemáticos (Akrigh e Kroll, 1998).

A regularidade com que, hoje em dia, as empresas são confrontadas com a necessidade de introduzir novos produtos para satisfazer o mercado leva a que sejam obrigadas, de uma forma continuada, a avaliar o sistema produtivo e a redefini-lo.

2.4. Definição de Sistemas de Produção Celulares Virtuais

Benjaafar *et al.* (2002) apresentam um estudo exaustivo de algumas tendências, em termos de organização do sistema produtivo, que procuram dar uma resposta às exigências do mercado. Referem, neste âmbito, o conceito das células de fabrico virtuais, que são conjuntos meramente conceptuais de equipamentos e componentes, por permitirem ajustes rápidos ao sistema de acordo com as variações na procura.

Como as células virtuais são grupos conceptuais de recursos produtivos, e a localização física dos recursos não é alterada, estas podem ser mais facilmente reconfiguradas sempre que as mudanças na procura a isso obriguem.

Um dos pioneiros no estudo deste tipo de configuração apresentou já vários trabalhos sobre as vantagens da utilização de células virtuais (Drolet *et al.*, 1989; Drolet *et al.*, 1991; Drolet *et al.*, 1996) e sobre como desenhar ou sequenciar a produção nestas células (Drolet *et al.*, 1989; Drolet *et al.*, 1990; Drolet *et al.*, 1995).

Ao afetar os equipamentos a famílias de componentes durante um período determinado, obtêm-se reduções nos tempos de preparação dos equipamentos, uma vez que estes irão processar, durante esse período, um conjunto limitado de componentes com características físicas e de processamento semelhantes. Adicionalmente, os fluxos são simplificados dado que os componentes têm rotas bem definidas. Por outro lado, como não há mudança na localização física dos equipamentos, estas células podem assumir um papel temporário, podendo facilmente ser alteradas o que lhes conferem um grande nível de flexibilidade. O facto de se utilizar uma configuração por processo do sistema de produção leva, porém, a que os custos de transportes de materiais sejam, normalmente, mais elevados do que nos sistemas de produção celulares convencionais.

Os dois principais problemas associados à fase de planeamento dos sistemas de produção por células virtuais são: (i) quando criar ou reconfigurar as células e (ii) como definir as células (Baykasoglu *et al.*, 1998). Verifica-se, contudo, que a maior parte dos trabalhos divulgados incidem sobre a segunda questão (Saad *et al.*, 2002; Baykasoğlu, 2003; Kesen *et al.*, 2009; Khilwani *et al.*, 2011).

Procurou-se, neste capítulo, enquadrar os sistemas de produção celulares no âmbito dos diferentes tipos de sistemas de produção discreta e definir os principais problemas relacionados com o planeamento, controlo e avaliação de um sistema de produção

celular. Abordou-se ainda o conceito de Sistemas de Produção Celulares Virtuais e os problemas base presentes aquando da definição deste tipo de sistema.

No próximo capítulo serão abordados alguns dos principais métodos para resolver os problemas associados ao planeamento de um sistema de produção celular, bem como algumas das limitações desses métodos.

3

Métodos para o Planeamento de Sistemas de Produção Celulares

Conteúdo

- Introdução
- Afetação das operações
- Formação das células de fabrico
- Duplicação de máquinas
- Implantação intracelular e implantação intercelular
- Planeamento de Sistemas de Produção Celulares Virtuais

3.1. Introdução

Tal como foi referido anteriormente (secção 2.3.1), as decisões subjacentes ao planeamento de um sistema de produção celular têm um forte impacto no seu desempenho futuro e são, por natureza, estruturais, no sentido em que têm um impacto de longo prazo: uma vez implementadas, a sua modificação obriga normalmente a elevados investimentos. No caso mais geral, o processo de decisão associado ao planeamento de sistemas de produção celulares passa pela resolução de um conjunto de problemas, nomeadamente:

- (i) a afetação das operações de fabrico às máquinas existentes;
- (ii) a definição das células de fabrico;
- (iii) a duplicação das máquinas;
- (iv) a definição da implantação intracelular;
- (v) a definição da implantação intercelular.

É de realçar que a interação entre estes problemas é bastante importante sendo, contudo, a sua resolução tradicionalmente sequencial e não simultânea, como seria conveniente (Arvindeh e Irani, 1994; Raminfar *et al.*, 2012).

No entanto, e como se verá nas próximas secções, a maioria dos autores que abordam os problemas associados ao planeamento de sistemas de produção celulares procuram resolver simultaneamente mais do que um destes subproblemas. Assim, a formação das famílias dos componentes e dos grupos de máquinas são, frequentemente, abordados em conjunto, considerando-se, por vezes, o aspeto da duplicação das máquinas. Por outro lado, os problemas das implantações, quer intracelular quer intercelular são, normalmente, considerados conjuntamente.

Neste capítulo são revistos alguns dos métodos mais relevantes para a resolução destes problemas sendo realçadas algumas das suas limitações.

3.2. Afetação das operações

Nos sistemas de produção celulares a determinação da máquina específica em que deverá ser efetuada uma operação surge como um dos problemas a nível de planeamento. Enquanto, num sistema de produção por processo a afetação de operações a máquinas assume um carácter operacional, uma vez que as operações podem ser afetadas a qualquer uma das máquinas funcionalmente idênticas que se encontram num determinado departamento, em função da sua disponibilidade, num sistema de produção celular a situação é diferente. Neste tipo de sistema torna-se necessário definir em que máquina, de um conjunto de equipamentos funcionalmente idênticos, é que cada operação é efetuada, pois esta definição é necessária para estabelecer o fluxo existente entre máquinas e, conseqüentemente, determinar a constituição das células de fabrico de modo a reduzir ou eliminar o fluxo intercelular.

Co e Araar (1988) propõem um procedimento de três fases para o problema da formação de células de fabrico em que a primeira fase trata da afetação das operações aos equipamentos. Atmani *et al.* (1995) apresentam um modelo matemático que aborda o problema da formação de células de fabrico considerando a existência de diversas máquinas funcionalmente idênticas, cuja função objetivo procura minimizar o somatório dos custos de operação, de preparação dos equipamentos e de transporte. Kusiak e Heragu (1987) propõem um método designado por *Knowledge Based Group Technology* que, tal como Choobineh e Nare (1999), aborda este problema em duas fases. Estes autores propõem métodos que procuram criar células completamente independentes (onde não exista fluxo intercelular) o que origina, no caso de sequências de operações muito complexas, células de fabrico com um número elevado de máquinas. Mais recentemente, Vin *et al.* (2005) e Adenso-Díaz e Lozano (2008) apresentam procedimentos, baseados em metaheurísticas (nomeadamente, algoritmos genéticos e pesquisa tabu), que procuram resolver os problemas da afetação das operações de fabrico e da formação das células de fabrico. Os dois problemas são porém resolvidos de forma sequencial e não integrada.

Como se pode verificar, alguns dos estudos que abordam o problema da afetação de operações a máquinas fazem-no conjuntamente com a resolução do problema da formação das células de fabrico. Contudo, na maioria dos trabalhos que tratam o problema da formação de células de fabrico é assumido que esta questão se encontra resolvida *a priori*, situação que se procura ultrapassar no presente trabalho.

3.3. Formação das células de fabrico

O problema da formação das células de fabrico pode ser subdividido em duas partes: a determinação das famílias de componentes e a formação das famílias de máquinas.

Existem algumas abordagens que procuram resolver o problema da formação das famílias de componentes isoladamente. Quando existe uma pequena variedade de componentes, uma mera análise visual pode levar à determinação das respetivas famílias. Contudo, se essa variedade aumenta torna-se necessário recorrer a outras técnicas. O procedimento mais habitual é, em primeiro lugar, classificar os componentes seguindo um esquema de codificação que se pode basear na semelhança física entre eles ou na semelhança entre os seus processos de fabrico e, seguidamente, agrupá-los de acordo com as semelhanças e/ou distâncias entre códigos atribuídos a esses componentes.

As medidas de semelhança entre os diversos componentes baseiam-se, essencialmente, em dois tipos de informação:

- os coeficientes de semelhança, determinados tendo em conta os diversos tipos de máquinas utilizados para processar os diferentes componentes (Shafer e Rogers, 1993);
- as sequências de operações a que são sujeitos os componentes de modo a poder agrupá-los em famílias de componentes com processos produtivos semelhantes (Tam, 1990).

A definição destes fatores permite a aplicação de técnicas, como: o método hierárquico de *clustering* (Kusiak e Chow, 1987) ou modelos matemáticos como, por exemplo, o modelo da p-mediana (Kusiak, 1985), cujo objetivo é o de determinar um conjunto de famílias de componentes onde a distância entre as medidas de semelhança dos componentes de uma dada família e a sua mediana seja minimizada.

Existem diversos estudos comparativos entre os diferentes coeficientes de semelhança utilizados na resolução do problema de formação de famílias de componentes (Kusiak e Cho, 1992; Seifoddini e Hsu, 1994; Islam e Sarker, 2000). Um dos mais atuais encontra-se no trabalho de Yin e Yasuda (2005), que apresentam uma comparação do desempenho de vinte dos coeficientes mais conhecidos.

Mais recentemente têm sido propostas abordagens, que têm como base a lógica *fuzzy*

conjugada com redes neuronais (Kuo *et al.*, 2006) ou métodos multicritério (Sangwan e Kodali, 2004), em que se procuram definir as famílias de componentes de acordo com as respetivas semelhanças em termos das características físicas.

A identificação das famílias de componentes é apenas parte da resolução do problema da formação das células de fabrico, após o que se torna essencial determinar quais as máquinas necessárias para processar a totalidade de uma família de componentes.

Deste modo, a maior parte dos autores, como se verificará nas próximas secções, procuram apresentar métodos que simultaneamente considerem os problemas da definição das famílias de componentes e de máquinas.

Por vezes têm sido apresentadas metodologias específicas para desenhar um sistema de produção celular, desenvolvidas para casos de estudo particulares (e.g. Da Silveira, 1999), que podem, contudo, ser generalizadas para serem aplicadas a outras situações.

Têm também surgido diversas aplicações e adaptações das mais variadas técnicas para resolver estes problemas. Uma primeira distinção entre os métodos utilizados na resolução do problema da formação das células de fabrico permite a separação entre os que se baseiam na matriz de incidência e os que se baseiam nouro tipo de dados (Vilarinho, 1997).

3.3.1. Métodos baseados na matriz de incidência

Estes métodos baseiam-se numa matriz do tipo da que é apresentada na figura 3.1. A matriz de incidência máquinas-componentes apresenta um conjunto de linhas que representam as máquinas existentes no sistema, enquanto que as colunas representam os componentes a serem processados nessas máquinas. Os elementos a_{ij} da matriz são binários, tomando o valor 1 quando o componente j é processado na máquina i , e 0 caso contrário.

		Componente									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Máquina	Célula	Família 1			Família 2			Família 3			
1	1	1	1	1	1						
2		1		1							
3	2					1	1				
4						1	1				
5	3					1			1	1	

Figura 3.1 - Exemplo de uma matriz de incidência máquinas-componentes na forma diagonal por blocos (MDB)

Neste tipo de métodos, a resolução do problema da formação de células de produção (que pressupõe a especificação conjunta de famílias de máquinas e de famílias de componentes) é equivalente a reduzir a matriz de incidência a uma forma diagonal por blocos (MDB- Matriz Diagonal por Blocos), com blocos de 1's e 0's ao longo da diagonal e 0's na restante matriz. Cada um daqueles blocos representa uma célula de produção (definida por uma família de máquinas e pela correspondente família de componentes).

O objetivo dos métodos que recorrem à matriz de incidência máquinas-componentes, ao reduzir esta matriz a uma forma diagonal por blocos (MDB), é o de criar blocos de 1's e 0's ao longo da diagonal e 0's nas outras posições, de maneira a conseguir o menor número possível de elementos excecionais, ou seja elementos unitários fora dos blocos definidos, blocos esses que correspondem a células.

Este objetivo por si só não é suficiente pois, para isso, bastaria considerar a matriz como um único bloco para se eliminar o número de elementos excecionais. Assim, são consideradas medidas auxiliares que permitam obter uma solução admissível, como por exemplo: impor um limite máximo às dimensões das células ou minimizar o número de elementos nulos dentro dos blocos.

As abordagens baseadas na matriz de incidência apresentam diversos problemas, entre os quais se destacam os seguintes:

- não consideram os valores reais dos fluxos, quer em termos de quantidades quer em termos de distâncias percorridas, não sendo portanto possível determinar até que ponto é ou não relevante eliminar um determinado fluxo;
- não consideram as sequências de operações a que os componentes estão

sujeitos. Utilizando a MDB apresentada na figura 3.1. como exemplo, não é possível saber se o componente 5 dá origem a dois movimentos intercelulares - caso a sequência de processamento seja (1,3,4,5) - ou três movimentos intercelulares - caso a sequência seja (1,3,5,4);

- não consideram a existência de mais do que uma unidade do mesmo tipo de máquina, não permitindo atribuir os componentes a máquinas específicas dado que indica apenas o tipo de máquina.

Independente do método adotado, uma questão importante é a de saber qual a qualidade das soluções obtidas. Assim, surgiu a necessidade de conceber medidas que permitam a avaliação destas mesmas soluções (Sarker e Mondal, 1999; Williams *et al.*, 1993; Agrawal *et al.* 2011).

Quaisquer que sejam os índices desenvolvidos existem três questões essenciais para avaliar qualquer projeto para um sistema de produção celular: (i) a sua aplicabilidade numa implantação real, (ii) a redução efetiva dos custos e a melhoria do desempenho da produção e, por último, (iii) a simplificação real dos fluxos de materiais, através da redução do fluxo intercelular.

3.3.1.1. Métodos matriciais e métodos de *clustering*

Estes métodos foram dos mais populares nas primeiras abordagens ao problema da formação de células de fabrico.

Começando pelos métodos matriciais, estes utilizam a matriz de incidência diretamente e rearranjam as suas linhas e colunas por forma a convertê-la numa MDB.

O método ROC (*Rank Ordering Clustering*), apresentado por King (1980), é dos mais referidos na literatura e utiliza uma técnica de ordenação binária para converter a matriz de incidência na forma diagonal por blocos apresentando, contudo, diversas limitações:

- os resultados são muito dependentes da forma da matriz inicial, não sendo a solução final necessariamente a melhor;
- exhibe uma tendência para agrupar os elementos unitários no canto superior esquerdo deixando o resto da matriz desorganizada;
- a identificação das famílias de máquinas e das famílias de componentes é

feita por inspeção visual da MDB, pelo que a identificação destas pode ser problemática, em particular se a MDB não é perfeita;

- a identificação e o tratamento de máquinas gargalo e componentes responsáveis por fluxo intercelular são arbitrários.

Extensões a este algoritmo foram desenvolvidos por King e Nakornchai (1982) e Chandrasekaran e Rajagopalan (1986) de maneira a ultrapassar algumas das limitações do método ROC.

Outros métodos matriciais foram desenvolvidos por Chan e Milner (1982) e Kusiak e Chow (1987). Estes métodos não conseguem, contudo, ultrapassar algumas das limitações principais do método ROC, nomeadamente a dependência da solução face à configuração inicial da matriz de incidência e a dificuldade em obter uma MDB claramente identificável.

Já os métodos de *clustering* podem ser divididos em métodos hierárquicos e em métodos não-hierárquicos.

Os métodos hierárquicos de *clustering* utilizam uma matriz de semelhanças máquinas-máquinas (McAuley, 1972) que se obtém da matriz de incidência. Cada elemento daquela matriz representa uma medida de semelhança entre um par de máquinas, que é função do número de componentes (i) processados simultaneamente em ambas as máquinas ou (ii) processados somente numa delas. É, também, possível definir-se uma matriz de semelhanças entre componentes, a qual é formada de um modo idêntico ao descrito para a matriz de semelhanças entre máquinas.

A semelhança entre as máquinas é definida recorrendo a coeficientes de semelhança que procuram avaliar quantos componentes partilham um certo par de máquinas. Os modos de definir esses coeficientes são variados. Sarker (1996), Shafer e Rogers (1993) e Kusiak e Cho (1992) apresentam estudos em que avaliam os coeficientes de semelhança existentes. Por outro lado, Seifoddini e Djassemi (1996b) e Jeon *et al.* (1998) apresentam propostas para a utilização de novos coeficientes.

Outros algoritmos de *clustering* têm sido propostos por diversos autores que conjugam esta abordagem com outros métodos (e.g. teoria de grafos e lógica *fuzzy*), por forma a incorporar outros aspetos do problema e a reduzir o tempo computacional (Wei e Kern, 1989; Chen e Irani, 1993; Srinivasan, 1994; Mukhopadhyay *et al.*, 1995; Oliveira *et al.*,

2009; Bortolini *et al.*, 2011). Podem-se encontrar estudos que avaliam este tipo de método em Seifoddini e Hsu (1994) e Shargal *et al.* (1995).

Estes métodos hierárquicos, ao recorrerem a coeficientes de semelhança, permitem uma abordagem mais estruturada ao problema da formação das células de fabrico, não estando a qualidade da solução tão dependente, como no caso dos métodos matriciais, da solução inicial. Porém, o recurso à informação contida na matriz de incidências apresenta as limitações já referidas anteriormente. Mais ainda, estes métodos obrigam a uma posterior formação de famílias de componentes.

Os métodos não-hierárquicos de *clustering*, por outro lado, vão formando os grupos de máquinas e as famílias de componentes de uma forma iterativa partindo de uma divisão inicial das máquinas. Essa partição e as subsequentes mudanças na constituição das células de fabrico são, da mesma forma que nos métodos hierárquicos de *clustering*, feitas tendo por base coeficientes de semelhança entre máquinas.

Dois dos métodos não-hierárquicos de *clustering* mais conhecidos são o método GRAFICS (Srinivasan e Narendran, 1991) e o ZODIAC (Chandrasekaran e Rajagopalan, 1987). Mais recentemente Yang *et al.* (2006) e Li *et al.* (2007) sugerem abordagens assentes em *fuzzy clustering*.

Estes métodos têm a vantagem de, na solução, serem identificadas tanto as famílias de máquinas como as famílias de componentes. A sensibilidade à partição inicial (especificação do número de *clusters*/células) e ao critério de *clustering* utilizado são as principais desvantagens destes métodos.

3.3.1.2. Outros métodos

Um dos aspetos interessantes da matriz de incidências, apesar das suas limitações, corresponde à facilidade com que é possível lidar e trabalhar a informação contida nesse tipo de matriz, o que permite a aplicação de métodos bastante diversos para a resolução do problema da formação das células de fabrico. A tabela 3.1 apresenta uma lista de alguns desses métodos que, por se basearem na matriz de incidências, apresentam, à partida, um conjunto importante de limitações, já especificadas.

Relativamente aos modelos matemáticos que são construídos para a resolução do problema de formação das células de fabrico, é importante referir que estes procuram recorrer não só à matriz de incidência mas também incluir diversos custos, que, de certo

modo, colmatam as falhas das abordagens baseadas na matriz de incidências. Desde a questão dos custos de duplicação das máquinas (custos de amortização, custos de oportunidade e de manutenção) a custos variáveis de utilização das máquinas, de transporte de material entre células e de formação do pessoal (Selim *et al.*, 1998) é possível formular os mais diversos modelos com variadas funções objetivos e restrições. A aceitação das limitações da utilização destas matrizes, quando se pretende obter soluções viáveis, tem levado autores a desenvolverem novos modelos em que procuram colmatar essas falhas (Zhou e Askin, 1998).

Contudo, a dificuldade de aplicação desses modelos a problemas de dimensão real, leva à construção de heurísticas e, muitas vezes, à aplicação de metaheurísticas, que permitam testar diversas soluções admissíveis e obter uma solução aceitável.

Tabela 3.1 - Métodos de resolução do problema da formação das células de fabrico

Modelos matemáticos	
Modelo p-mediana	Deutsch, 1998
Programação binária	Logendran, 1993; Elbenani e Ferland, 2012
Programação linear	Boctor, 1991
Programação inteira mista	Adil <i>et al.</i> , 1993
Metaheurísticas	
Arrefecimento simulado	Chen <i>et al.</i> , 1995; Adil <i>et al.</i> , 1997; Su e Hsu, 1998; Wu <i>et al.</i> , 2008; Lin <i>et al.</i> , 2010; Paila <i>et al.</i> , 2010; Ying <i>et al.</i> , 2011
Algoritmos genéticos	Moon e Gen, 1999; Khoo e Yin, 2003; Mansouri <i>et al.</i> , 2003; Arkat <i>et al.</i> , 2011; Saraç e Ozcelik, 2012
GRASP	Adil e Ghosh, 2005; Díaz <i>et al.</i> , 2012
Sistemas de colónias de formigas	Islir, 2005; Li <i>et al.</i> , 2010
Algoritmos genéticos + VNS	Paydar e Saidi-Mehrabad, 2013
Outras (<i>Bacteria foraging algorithm, Water flow-like algorithm, Firefly-inspired algorithm</i>)	Nouri e Hong, 2012; Wu <i>et al.</i> , 2010; Sayadi <i>et al.</i> , 2013
Outras abordagens	
<i>Multidimensional Scaling</i>	Mukhopadhyay <i>et al.</i> , 1994
<i>Soft computing</i>	Venugopal, 1999
Redes neuronais	Venugopal e Narendran, 1994; Yang e Yang, 2008

É de realçar que os métodos com base em metaheurísticas têm vindo a ganhar preponderância sobre outro tipo de abordagens, nomeadamente os modelos matemáticos que, embora surjam como meio de formalizar o problema, são, usualmente

seguidos de um procedimento de pesquisa computacionalmente menos exigente e que, para problemas NP-difíceis, permitem obter boas soluções. Ghosh *et al.*, 2011 apresentam uma revisão exaustiva da utilização de metaheurísticas no âmbito dos sistemas de produção celulares.

De notar também que, apesar das fortes limitações existentes na utilização da matriz de incidências, verifica-se (pela simples observação da tabela anterior) que são ainda muitos os autores que utilizam esta estrutura de dados como base de desenvolvimento de novas abordagens ao problema da formação de células de fabrico. Li (2003) alarga, inclusive, a utilização deste tipo de matriz incorporando, no problema, outros fatores, como por exemplo trabalhadores e sistemas de transporte. Integra, depois, as diferentes matrizes numa estrutura única que utiliza para resolver o problema da formação das células de fabrico.

3.3.2. Métodos baseados noutros tipos de dados

Um tipo de informação que tem servido de base para muitos trabalhos é a sequência de processamento dos componentes em que se indica a ordem pela qual os componentes utilizam cada tipo de máquina (Arkat *et al.*, 2007; Mahdavi e Mahadevan, 2008; Mahdavi *et al.* 2008; Pandian e Mahapatra, 2009; Ahi *et al.*, 2009).

Estas sequências são, muitas vezes, apresentadas na forma de uma matriz semelhante à matriz de incidências em que os elementos são nulos, se aquele componente não utiliza aquele tipo de máquina, ou apresentam um valor inteiro, que indica a ordem em que aquele componente utiliza aquele tipo de máquina.

Este tipo de informação permite perceber o número de movimentos que são realizados entre células, ultrapassando assim uma das limitações da matriz de incidências, mas não avalia a dimensão (em termos de quantidade de material ou número de viagens) do fluxo gerado por esses movimentos.

Existem outros autores que optam por basear a formação das células no fluxo real entre as células tendo por base a informação contida numa matriz de fluxos entre máquinas. A utilização dos valores de fluxo pode ter por base quer algumas técnicas de otimização como o *branch-and-bound* (Song e Hitomi, 1992), quer heurísticas (Okogbaa *et al.*, 1992) ou metaheurísticas (Lei e Wu, 2005).

A simulação, também utilizada neste contexto (Steudel, 1998), apesar de ser uma ferramenta poderosa, é utilizada apenas como um meio de comparação entre configurações alternativas da constituição das células, confinando as soluções possíveis ao número limitado de cenários testados.

Uma outra forma de tratar este problema passa pela definição de células dinâmicas, ou seja células cuja configuração é alterada mediante as variações na procura. Estes procedimentos são, normalmente, desenvolvidos analisando essa procura num horizonte multi-período (Tavakkoli-Moghaddam *et al.*, 2005; Mahdavi *et al.*, 2010; Deljoo *et al.*, 2010; Saxena e Jain, 2011; Fan e Feng, 2013).

Uma outra questão a salientar, que se coloca atualmente, ao aplicar estas diversas técnicas ao problema de formação das células de fabrico, é a da definição de quais são, na realidade, as variáveis de entrada do problema. Definir, à partida, o número máximo de células ou número máximo de máquinas por célula é muito comum na resolução deste problema, porém é bastante plausível que estes parâmetros não sejam dados de entrada mas sejam variáveis de saída, a serem definidas aquando da divisão ótima das máquinas em grupos e dos componentes em famílias.

Por outro lado, a um nível mais prático, o que se verifica, na realidade, é que as empresas que optam por organizar o seu processo produtivo em células de fabrico impõem, de facto, um limite ao tamanho destas, quer ao nível do número de máquinas e de componentes a processar quer ao nível do número de trabalhadores afetados à célula. Na prática o que se verifica é que, caso esses limites não sejam impostos, perdem-se as vantagens da produção celular, o sistema fica mais desorganizado e o controlo autónomo de cada célula é dificultado.

Papaioannou e Wilson (2010) apresentam uma revisão dos trabalhos desenvolvidos entre 1997 e 2008 para o problema da formação de células de fabrico, apontando estas e outras questões como trabalho futuro.

3.4. Duplicação de máquinas

O objetivo de um SPC é o de formar grupos de máquinas que processem na totalidade uma família de componentes. Para atingir este objetivo, e deste modo eliminar o fluxo intercelular é, por vezes, necessário proceder à duplicação de certas máquinas requeridas no processamento de mais do que uma família de componentes.

Segundo alguns autores (por exemplo, He e Kusiak, 1998) existem diversas formas de se lidar com os componentes gargalo, ou seja aqueles componentes cujo processamento é responsável por fluxo intercelular. Os métodos propostos por aqueles autores incluem:

- o processamento dos componentes em células diferentes, o que de facto não elimina os fluxos intercelulares;
- o processamento dos componentes gargalo numa unidade/departamento organizado por processo;
- a subcontratação da produção dos componentes gargalo;
- a modificação dos planos de processamento de cada componente gargalo, de maneira a que possam ser processado numa única célula;
- o redesenho de cada componente gargalo de maneira a que o plano de processamento resultante possa ser totalmente incluído numa célula.

Um pressuposto razoável é o de assumir que as simplificações possíveis, quer no componente quer no respetivo plano de processamento, já teriam sido efetuadas uma vez que essas devem ser as primeiras possibilidades a serem colocadas. Quando tal não é possível, a alternativa da duplicação de equipamentos deverá ser considerada.

Naturalmente, para além destas possibilidades, uma alternativa sempre presente é a análise da situação em que poderá ser vantajoso duplicar uma determinada máquina noutra célula de maneira a eliminar um certo fluxo intercelular, ou ainda a situação em que uma operação é responsável por grande parte dos fluxos intercelulares e poderá ser vantajoso subcontratar essa operação. Logendran e Ramakrishna (1997) apresentam um modelo matemático e, de seguida, aplicam uma abordagem baseada em pesquisa tabu, que consideram simultaneamente as possibilidades da duplicação de equipamentos e da subcontratação de componentes, tendo por base os custos associados a estas alternativas face à potencial redução do fluxo intercelular.

Bortolini *et al.* (2011) propõem também um modelo híbrido que conjuga programação matemática com análise de *clusters*, para determinar a constituição das células de fabrico mas admitindo a possibilidade de duplicação de equipamentos. O modelo proposto avalia os custos de aquisição e de manutenção de um equipamento face aos custos do fluxo intercelular.

Verifica-se assim que, de uma forma geral, a resolução deste problema envolve, basicamente, uma análise de compromissos entre o custo de aquisição, amortização e operação de uma máquina e/ou ferramenta nova, e a redução de custos devida à eliminação de determinados fluxos intercelulares.

Garza e Smunt (1994), tendo por base a simulação de um sistema de produção celular, procuraram verificar até que ponto o desempenho desse sistema é sensível à redução do fluxo intercelular. Os resultados indicam que os sistemas com (i) pouca variabilidade dos tempos produtivos, (ii) lotes produtivos de reduzida dimensão, (iii) tempos de preparação elevados e (iv) grandes reduções nos tempos de preparação devido à utilização de células dedicadas, são, de facto, mais sensíveis à redução do fluxo intercelular. Desta forma, é mais admissível, nestes cenários, o investimento em máquinas e/ou ferramentas de maneira a reduzir o fluxo entre as células.

3.5. Implantação intracelular e implantação intercelular

O problema das implantações fabris é importante, não só no projeto de sistemas de produção celular, como em qualquer outro tipo de sistema de produção discreta, uma vez que tem impacto no desempenho global do sistema de produção, nomeadamente, ao nível dos tempos de fluxo, das existências em curso de fabrico e da taxa de utilização dos espaços (Irani *et al.*, 2000).

O projeto de uma implantação fabril deve ser avaliado tendo em conta um conjunto de fatores tão variados como o custo de transporte de materiais, a utilização do espaço da área fabril, a facilidade de expansão futura, a flexibilidade da implantação, entre outros. A condensação de todos estes fatores num único critério, de acordo com o qual configurações alternativas sejam avaliadas, é uma tarefa muito complexa. A opção adotada na maior parte da literatura conhecida é a do recurso ao custo de transporte de materiais como medida de avaliação da qualidade das implantações fabris. A razão de ser de tal opção prende-se com o forte impacto que os custos de transporte têm nos custos totais de operação das unidades industriais (Tompkins *et al.*, 2010).

O tipo de recursos a dispor na área fabril deu origem a três formas distintas de abordar o problema das implantações fabris, nomeadamente:

- recursos com áreas iguais,
- recursos com áreas diferentes,
- recursos com configuração geométrica fixa.

Se todos os recursos tiverem a mesma área ou puderem ser fisicamente permutadas sem que se alterem as distâncias entre si, o problema das implantações resume-se então à determinação da melhor afetação das secções às localizações possíveis.

Quando os recursos têm áreas diferentes, não é possível especificar antecipadamente as suas localizações potenciais, uma vez que estas dependem da configuração da área de implantação. Assim, na implantação de recursos com áreas diferentes há um elevado número de implantações possíveis, existindo um grande número de configurações que conduzem a ótimos locais, muito afastados do ótimo global. Normalmente, as técnicas aplicadas a este tipo de problemas dividem a área fabril numa grelha retangular, afetando cada secção a um conjunto de células desta grelha. Esta abordagem conduz a

secções com formas irregulares, pelo que não podem ser aplicadas aos casos em que a geometria das secções é fixa.

O problema da implantação de recursos com geometria fixa não tem merecido grande atenção por parte dos investigadores, apesar da sua grande importância do ponto de vista prático, pois é o único cuja resolução pode conduzir ao projeto detalhado de implantações. Este problema é frequentemente designado por *machine layout problem* (e.g., Heragu, 1990) e as abordagens que têm sido propostas para a resolução deste problema baseiam-se, normalmente, em programação não linear, encarando a área fabril como um plano contínuo (Heragu, 1990; Tam e Li, 1991; Iman e Mir, 1993; Vilarinho e Guimarães, 2003), o que as torna computacionalmente exigentes.

Num sistema de produção celular a resolução do problema das implantações fabris engloba dois subproblemas que são, normalmente, resolvidos de uma forma sequencial: (i) o da implantação intracelular e (ii) o da implantação intercelular (Wang *et al.*, 2001).

O objetivo do problema da implantação intracelular é o de obter a melhor disposição das máquinas em cada uma das células de fabrico, por forma a minimizar os custos dos transportes intracelulares. O objetivo do problema da implantação intercelular é o de determinar a melhor localização relativa das células na área fabril, por forma a minimizar o custo de transporte de materiais entre células.

No contexto dos sistemas de produção celulares é importante que o problema da definição da implantação fabril considere a colocação de recursos com configuração geométrica fixa já que, a nível celular, os objetos a colocar são máquinas, naturalmente com uma forma já definida, e a nível da área fabril pretende-se colocar células cuja implantação já deverá estar definida, condicionando assim o seu formato geométrico e respetivas dimensões.

Este problema não tem atraído tanta atenção, por parte dos investigadores, como o problema da formação de células de fabrico (Wang *et al.*, 2001) mas existem, contudo, alguns autores que procuram desenvolver procedimentos adaptados ao problema específico da definição da implantação de sistemas de produção celulares. Esses trabalhos (Wang *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2001) utilizam modelos matemáticos e recorrem a técnicas como o arrefecimento simulado de forma a explorar o espaço de soluções, abordando simultaneamente o problema da implantação intracelular e o da implantação intercelular. Por outro lado, assumem que se tratam de problemas de

afetação em que todos os recursos têm a mesma área. Solimanpur *et al.* (2004) tratam, mais uma vez esta questão, como um problema de afetação, propondo um modelo matemático e um procedimento com base em sistemas de colónias de formigas que considera, somente a definição da implantação intercelular com vista a minimizar o fluxo entre células. Mais recentemente, o trabalho de Krishnan *et al.* (2012) integra este problema com a definição da formação de células de fabrico. Estes autores utilizam algoritmos genéticos para definir a ordem de afetação das células às localizações disponíveis no espaço fabril, tratando as células como recursos com áreas iguais.

A escassez de trabalhos, dirigidos a sistemas de produção celulares, em que se assume que os recursos têm uma configuração geométrica fixa, motivou o desenvolvimento de um procedimento, que tem por base algoritmos genéticos (ver capítulo 6).

3.6. Planeamento de Sistemas de Produção Celulares Virtuais

As células virtuais são grupos conceptuais de recursos produtivos. Nesse tipo de sistema os equipamentos permanecem organizados em departamentos sendo as famílias de componentes definidas para um determinado período de tempo. Se a tipologia da procura se altera as células podem ser reformuladas sem que isso implique a mudança física da implantação.

Ao afetar os equipamentos a famílias de componentes durante um período determinado, obtêm-se reduções nos tempos de preparação dos equipamentos, uma vez que estes irão processar, durante esse período, um conjunto limitado de componentes com características físicas e de processamento semelhantes. Adicionalmente, os fluxos são simplificados dado que os componentes têm rotas bem definidas. Mais ainda, como estas células podem assumir um papel temporário, podendo facilmente ser alteradas, o sistema apresenta um grande nível de flexibilidade e adaptabilidade a mudanças na procura.

Por outro lado, ao ser utilizada uma configuração por processo do sistema de produção, os custos de transportes de materiais acabam por ser, normalmente, mais elevados do que nos sistemas de produção celulares convencionais.

Tal como em qualquer outro tipo de sistema de produção, existem questões que surgem quer no planeamento quer na utilização de sistemas de produção celulares virtuais. As questões operacionais que têm sido abordadas na literatura passam pela afetação de trabalhadores às células virtuais (Murali *et al.*, 2010), pelo sequenciamento das tarefas neste tipo de sistema (Kesen *et al.*, 2010) e pelo dimensionamento dos lotes produtivos (Mertins *et al.*, 2000; Kesen e Güngör, 2011).

Na fase de planeamento, por outro lado, os dois principais problemas identificados são: (i) quando criar ou reconfigurar as células e (ii) como definir as células (Baykasoglu *et al.*, 1998).

A primeira dessas questões não tem recebido muita atenção por parte dos investigadores que, para já, têm apenas analisado com maior profundidade em que circunstâncias poderá ser interessante utilizar células virtuais. Os trabalhos nesta área têm, maioritariamente, recorrido a simulação (Kannan, 1997; Saad *et al.*, 2002; Suresh e Slomp, 2005; Kesen *et al.*, 2009) como forma de compararem o desempenho das células

virtuais com o de outros tipos de configurações (células tradicionais ou departamentos funcionais).

Quando se trata da definição da constituição das células virtuais surge o problema da formação das famílias de componentes e o problema da definição dos grupos de máquinas. Neste tipo de sistema a formação das famílias de componentes deve assumir um papel preponderante, dado que não há um agrupamento físico dos equipamentos, o que acaba por remeter a definição dos grupos de máquinas para segundo plano.

Verifica-se, porém, que os métodos para o problema da formação de células de fabrico virtuais, nomeadamente algoritmos de pesquisa aleatória e heurísticas construtivas, costumam ter como ponto de partida a criação do grupo de máquinas (Ko e Egbelu, 2003; Khilwani *et al.*, 2011).

Nomden *et al.* (2006) apresentam uma revisão detalhada de trabalhos que abordam quer os aspetos relacionados com o planeamento de sistemas de produção celulares virtuais quer os seus aspetos operacionais.

Efetivamente um dos problemas centrais do projeto de um sistema de produção celular (tradicional ou virtual) é a formação das famílias de componentes. Enquanto que num sistema de produção celular tradicional esta questão é resolvida, normalmente, juntamente com a definição dos grupos de máquinas, num sistema de produção celular virtual este problema deve assumir um papel mais central.

Neste contexto são de realçar novamente as abordagens mais utilizadas para formar famílias de componentes. Assim, quando se pretende formar famílias de componentes uma das técnicas mais utilizadas é recorrer a coeficientes (de semelhança ou dissemelhança) que permitem avaliar a qualidade das famílias formadas.

Um dos primeiros coeficientes a ser utilizado no problema da formação de células de fabrico foi o coeficiente de semelhança de *Jaccard* (McAuley, 1972) que é definido para cada par de máquinas. Outros autores propuseram novos coeficientes, contudo na maior parte das situações são somente aplicáveis ao problema da formação de grupos de máquinas (Seifoddini, 1990; Luong, 1993; Islam e Sarker, 2000; Yasuda e Yin, 2001). Adicionalmente esses coeficientes foram desenvolvidos tendo em conta as particularidades de um sistema de produção celular tradicional.

Outra limitação é a de que um grande número dos coeficientes desenvolvidos utiliza a

informação da matriz de incidências (Kusiak e Cho, 1992; Islam e Sarker, 2000; Yasuda e Yin, 2001, entre outros). Estas matrizes binárias, já explicadas anteriormente, apesar de serem amplamente utilizadas na resolução do problema de formação das células de fabrico, excluem uma grande quantidade de informação de relevo, nomeadamente: (i) a sequência de processamento dos diferentes componentes, (ii) o volume de componentes a ser processado e (iii) a máquina específica a realizar cada operação (indica apenas o tipo de máquina).

Alguns estudos comparativos dos diferentes coeficientes de semelhança e/ou dissemelhança podem ser encontrados em Kusiak e Cho (1992), Seifoddini e Hsu (1994), Islam e Sarker (2000) e mais recentemente em Yin e Yasuda (2005).

Jeon *et al.* (1998) apresentam um coeficiente que considera a máquina específica em que a operação irá ser realizada contudo esta questão é mais relevante no caso de se pretender resolver a questão da formação dos grupos de máquinas ou da formação das células (máquinas e componentes) num sistema de produção celular tradicional.

Num sistema de produção celular virtual, como foi explicado anteriormente, as máquinas permanecem agrupadas em departamentos de acordo com a sua funcionalidade e podem ser partilhadas por mais que uma família de componentes. Deste modo, a utilização do conceito de semelhança entre máquinas não é razoável para resolver o problema da formação de células de fabrico virtuais. Nesta situação a formação dos grupos de máquinas envolve questões como: (i) afetação das famílias de componentes às máquinas, (ii) balanceamento da carga de trabalho entre as diferentes máquinas do mesmo tipo, (iii) determinação de regras de prioridade entre as famílias que partilham a mesma máquina, entre outras.

Por outro lado, é perfeitamente lógico utilizar coeficientes de semelhança entre componentes para formar famílias. De entre os coeficientes desenvolvidos especificamente para o problema de formação de famílias de componentes destaca-se o trabalho de Dutta *et al.* (1986) que, contudo, não considera a sequência de processamento dos componentes, e o trabalho de Tam (1990), que já considera esse aspeto. Esse coeficiente é determinado para cada par de componentes e determina o número de alterações (apagar, inserir ou substituir uma operação) que é necessário realizar numa das sequências de fabrico de modo a obter a outra sequência. Uma limitação, contudo, deste coeficiente deve-se à atribuição do mesmo peso a aspetos distintos das diferenças entre as sequências de processamento. Por exemplo, não

distingue diferenças na ordem pela qual as operações são requeridas face à situação em que é necessária uma operação extra (que poderá implicar viagens extra para e de outro departamento) ou uma operação a menos.

Nos algoritmos apresentados neste trabalho procurou-se ultrapassar algumas das limitações dos coeficientes de semelhança conhecidos e, ao integrá-los em procedimentos com base em algoritmos genéticos, desenvolveram-se duas abordagens para a definição da constituição das células virtuais: tendo por base uma implantação organizada por processo ou uma implantação distribuída (ver capítulo 5).

4

Desenvolvimento de Algoritmos para a Formação de Células de Fabrico

Conteúdo

- Introdução
- Modelo de programação matemática
- Algoritmo geral de arrefecimento simulado
- Aplicação do algoritmo de arrefecimento simulado ao problema da formação de células de fabrico
- Balanceamento de células de fabrico
- Conclusões

4.1. Introdução

Como se referiu anteriormente, um dos principais problemas no planeamento de um sistema de produção celular é o da formação das células de fabrico, ou seja, a definição das famílias de componentes e dos grupos de máquinas que permitam a obtenção de células de fabrico independentes. A maioria dos métodos que têm sido propostos para a resolução do problema da formação de células de fabrico (apresentados no capítulo 3) apresenta um conjunto de limitações na sua aplicação a sistemas reais, nomeadamente:

- (i) a utilização da matriz de incidência máquinas-componentes, a qual não considera a sequência de operações efetuadas sobre cada componente, nem o volume de fluxo entre estas operações, o que conduz, nos casos em que existe fluxo intercelular, a uma perda total de controlo sobre a qualidade da solução obtida;
- (ii) o pressuposto de que as operações são realizadas numa máquina específica, ou seja, admitem que as operações são pré-afetadas às máquinas existentes, o que limita a flexibilidade na obtenção de uma boa solução nos casos em que existem rotas alternativas para os diferentes componentes.

Recentemente foram propostos alguns métodos que, no sentido de colmatar algumas destas limitações, utilizam informação referente às sequências de operações ou à matriz de fluxo para resolver o problema da formação das células de fabrico (por exemplo, Davies *et al.*, 2013; Ahi *et al.*, 2009; Jayaswal e Adil, 2004; Won e Lee, 2001; Sofianopoulou, 1997; Del Valle *et al.*, 1994; Okogbaa *et al.*, 1992). Contudo, a questão da afetação das operações às diversas máquinas existentes não é considerada por esses métodos. Uma vez que, na maioria dos sistemas de produção celulares, existem várias máquinas funcionalmente idênticas, os componentes podem ser produzidos de acordo com rotas alternativas, pelo que a afetação de operações a máquinas deve ser considerada no problema da formação das células de fabrico.

Vin *et al.* (2005) apresentam um procedimento, baseado em algoritmos genéticos, que considera a afetação das operações de fabrico e a formação das células de fabrico. Contudo, o algoritmo apresenta duas fases, sendo os problemas resolvidos sequencialmente. Os próprios autores apontam para a necessidade da resolução integrada destas questões.

Nas secções seguintes apresentam-se um modelo matemático e uma heurística cujo objetivo é o de resolver simultaneamente os problemas da formação das células de fabrico e da afetação de operações a máquinas. A abordagem apresentada é diferente das referidas na literatura por: (i) permitir que tanto operações como máquinas mudem de célula, após a definição de uma solução inicial, permitindo a exploração de um maior número de soluções potenciais, e (ii) considerar a possibilidade de uma operação ser dividida e afetada a máquinas diferentes, ou seja, permite que dois lotes de um mesmo componente sejam processados por rotas diferentes. Este aspeto da divisão das operações ocorre quando, num sistema real, as máquinas funcionalmente idênticas são utilizadas perto da sua capacidade limite ou quando duas ou mais máquinas idênticas têm de ser colocadas numa mesma célula para produzir grandes lotes de um mesmo componente.

4.2. Modelo de programação matemática

Para a definição do modelo de programação matemática e do algoritmo (que se apresenta nas secções seguintes) para o problema da formação de células de fabrico, assumem-se os seguintes pressupostos:

- (i) o fluxo produtivo é estável ao longo do horizonte de planeamento;
- (ii) a produção pode ser realisticamente representada por um conjunto limitado de componentes;
- (iii) a procura de cada componente é conhecida para o horizonte de planeamento;
- (iv) a sequência de operações de cada componente é conhecida.

Com base nestes pressupostos torna-se possível a determinação do fluxo entre duas operações, f_{ij} , que representa a quantidade de componentes que, após serem sujeitos à operação i , são submetidos à operação j .

Considera-se ainda que cada operação ($i=1, \dots, O$) pode ser executada em diversas máquinas funcionalmente idênticas ($m=1, \dots, M_i$), e que existem diversos tipos de máquinas ($t=1, \dots, T$). Cada operação i utiliza uma percentagem da capacidade disponível em qualquer máquina do tipo t (α_{it}). O objetivo do modelo é o de agrupar as máquinas em células ($c=1, \dots, C$) em que o número máximo de máquinas por célula é MC , enquanto, simultaneamente afeta as operações às máquinas disponíveis, minimizando o fluxo intercelular. De notar que, tanto o limite superior do número de máquinas por célula (MC), como o número máximo de células (C) são definidos pelo decisor.

Consideram-se as seguintes variáveis de decisão:

$$x_{imt} = \begin{cases} 1, & \text{se a operação } i \text{ utiliza a } m \text{ - ésima máquina do tipo } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{mtc} = \begin{cases} 1, & \text{se a } m \text{ - ésima máquina do tipo } t \text{ é afectada à célula } c \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$z_{imt} = \text{percentagem do número de componentes sujeitos à operação } i \text{ afectada à } m \text{ - ésima máquina do tipo } t$$

O problema de formação das células de fabrico é então formulado do seguinte modo:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^O f_{ij} \left(\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{M_t} \sum_{n=1}^{M_t} \sum_{c=1}^C Z_{imt} \cdot Z_{jnt} \cdot (1 - X_{imt} \cdot X_{jnt} \cdot Y_{mtc} \cdot Y_{ntc}) \right) \quad (4.1)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^O Z_{imt} \cdot \alpha_{it} \leq 1 \quad (m= 1, \dots, M_t; t= 1, \dots, T) \quad (4.2)$$

$$\sum_{m=1}^{M_t} y_{mtc} \leq MC \quad (t= 1, \dots, T; c= 1, \dots, C) \quad (4.3)$$

$$\sum_{m=1}^{M_t} Z_{imt} = 1 \quad (i= 1, \dots, O; t= 1, \dots, T) \quad (4.4)$$

$$\sum_{c=1}^C y_{mtc} = 1 \quad (m= 1, \dots, M_t; t= 1, \dots, T) \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} X_{imt} &\geq Z_{imt} \\ X_{imt} &\leq M Z_{imt} \end{aligned} \quad (i= 1, \dots, O) \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} X_{imt}, y_{mtc} &\in \{0, 1\} \\ Z_{imt} &\in [0, 1] \end{aligned} \quad (4.7)$$

A função objetivo (4.1) procura minimizar o fluxo intercelular. Este fluxo é calculado determinando as situações em que duas operações são realizadas em células diferentes e existe fluxo entre elas.

As restrições do tipo (4.2) garantem que a capacidade disponível em cada máquina não é excedida verificando que o somatório da percentagem de capacidade utilizada pelas operações afetadas a essa máquina não excede os 100%

As restrições do tipo (4.3) destinam-se a limitar o número de máquinas por célula, de acordo com um parâmetro definido pelo utilizador (MC).

As restrições do tipo (4.4) asseguram que cada operação é afetada na totalidade, a uma ou mais máquinas.

As restrições do tipo (4.5) garantem que cada máquina é afetada a uma e uma só célula.

É, ainda, garantido com base nas restrições do tipo (4.6), que se $z_{imt} \neq 0$ então $x_{imt} = 1$ e se $z_{imt} = 0$ então $x_{imt} = 0$, ou seja, se parte de uma operação é efetuada na m -ésima máquina do tipo t então essa operação utiliza essa máquina. Por outro lado, se a operação não é parcialmente realizada nessa máquina, então a operação não utiliza a máquina em questão (nestas restrições M representa um valor inteiro muito elevado).

Por último as restrições (4.7) fixam o domínio das variáveis utilizadas.

O modelo de programação matemática apresentado pretende resolver simultaneamente os problemas da definição da composição das células de fabrico e da afetação das operações às máquinas existentes. Contudo, face à natureza combinatoria do problema, e dada a impossibilidade de o resolver, em tempo útil, usando métodos de otimização, foi desenvolvido um algoritmo de arrefecimento simulado para a determinação de soluções quasi-ótimas para o problema, que se apresenta na secção seguinte. O algoritmo baseia-se numa matriz de fluxo entre operações que, contrariamente à tradicional matriz de incidência, representa fluxos reais entre as operações envolvidas no processamento dos diferentes componentes. Esta matriz é obtida tendo em conta a procura de cada componente ao longo do horizonte de planeamento e a sequência de operações de cada componente.

4.3. Algoritmo geral de arrefecimento simulado

O algoritmo de arrefecimento simulado (no original *Simulated Annealing*) foi inicialmente proposto por Kirkpatrick *et al.* (1983) como um método para obter boas soluções na resolução de problemas de natureza combinatória. Desde então este algoritmo tem sido aplicado a problemas de otimização de áreas tão diversas como projetos de computador, física e química molecular, processamento de imagens e sequenciamento de tarefas em ambientes tipo *job-shop* (Eglese, 1990). Esta metaheurística tem sido amplamente aplicada ao problema da formação de células de fabrico sendo Su e Hsu (1998), Adil *et al.* (1997), Sofianopoulou (1997), Chen *et al.* (1995), Arkat *et al.* (2007), Lin *et al.* (2010), Pailla *et al.* (2010) e Ying *et al.* (2011), alguns dos autores que utilizaram esse procedimento. Ghosh *et al.* (2011) apresentam uma revisão da aplicação de metaheurísticas a sistemas de produção celulares, fazendo uma comparação entre as diferentes abordagens utilizadas aquando da aplicação do algoritmo de arrefecimento simulado.

Esta diversidade de aplicações é ilustrativa das potencialidades desta técnica na resolução dos mais variados tipos de problema inclusive para a resolução do problema em análise.

O arrefecimento simulado é 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, processo este que o algoritmo homónimo procura emular.

De uma forma sintetizada o processo de arrefecimento compreende os seguintes passos:

- (i) o sistema é colocado inicialmente a um nível de temperatura adequado (T_0),
- (ii) o sistema é então arrefecido de uma forma controlada, seguindo uma curva de temperatura do tipo da apresentada na figura 4.1, a qual é escolhida por forma a evitar que o sistema cristalize num nível de energia indesejado,
- (iii) o sistema permanece um tempo pré-determinado (L) em cada patamar de temperatura (T_i),
- (iv) o arrefecimento do sistema termina (T_f) quando se atinge o estado de energia pretendido.

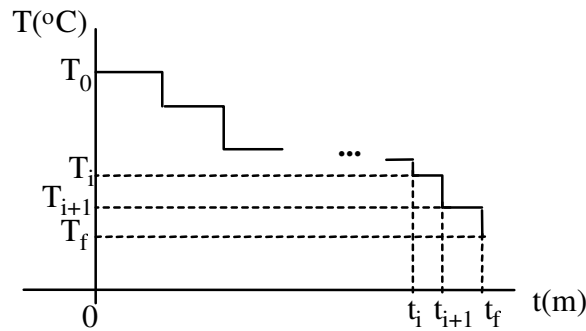


Figura 4.1 - Curva de temperatura de um processo de arrefecimento

A aplicação desta lógica a problemas de otimização combinatória permite pesquisar o espaço de soluções admitindo inclusive a aceitação de soluções piores por forma a que o algoritmo não 'congele' num ótimo local.

Para se perceber melhor a forma de aplicação deste algoritmo é apresentado, na figura 4.2 o pseudo-código do algoritmo geral de arrefecimento simulado, no qual se consideram os seguintes parâmetros de entrada: (i) S_0 , uma solução inicial admissível para o problema, (ii) T_0 , a temperatura inicial e (iii) L , a duração de um patamar de temperatura. Naquela figura S^* representa a melhor solução encontrada (parâmetro de saída), S representa a solução corrente, S_n representa a solução candidata a substituir a solução corrente e $C(S)$ representa o valor da função objetivo para a solução S .

```

T ← T₀
S ← S₀
S* ← S₀
enquanto (não cristaliza) faz
  n ← 1
  repete
    gera uma solução Sₙ ≠ Sₙ₋₁ na vizinhança de S;
    Δ ← C(Sₙ) - C(S);
    se (Δ ≤ 0) então S ← Sₙ;
    senão S ← Sₙ com probabilidade p=e-Δ/T;
  fimse
  se (C(S) < C(S*)) então S* ← Sₙ fimse;
  n ← n+1;
até (n > L);
reduz a temperatura T;
fimfaz;
fim.

```

Figura 4.2 - Pseudo-código do algoritmo geral de arrefecimento simulado

O algoritmo geral de arrefecimento simulado evolui a partir de uma solução inicial admissível para o problema, S_0 . No ciclo interno do algoritmo, repetido enquanto $n \leq L$, é gerada uma solução vizinha, S_n , da solução corrente S . No caso de S_n corresponder a uma solução melhor que S ($\Delta \leq 0$) então a solução gerada substitui a solução corrente, caso contrário a solução é aceite de acordo com uma determinada probabilidade ($p = e^{-\Delta/T}$). No ciclo externo do algoritmo a temperatura T vai sendo reduzida, o que vai diminuindo a probabilidade de se aceitarem soluções piores do que a solução corrente. Naturalmente, a melhor solução encontrada durante a execução do algoritmo, de entre as diversas soluções geradas, é sempre mantida (S^*). Outro aspeto importante é que a geração das soluções vizinhas obriga a que as soluções geradas em duas iterações consecutivas sejam diferentes ($S_n \neq S_{n-1}$).

A característica mais interessante deste algoritmo é a possibilidade de aceitar soluções piores, o que lhe permite escapar de mínimos locais. De qualquer modo, o seu desempenho depende em grande parte dos seguintes parâmetros de controlo:

- (i) A *temperatura inicial* (T_0) deve ser suficientemente elevada para que na primeira iteração a probabilidade do algoritmo aceitar soluções piores seja de, pelo menos, 80% (Kirkpatrick *et al.*, 1983).
- (ii) A *função de redução da temperatura* mais utilizada é geométrica: $T_i = a_i * T_{i-1}$ ($a_i < 1$ constante).
- (iii) O *comprimento do patamar* (L) determina o número de soluções geradas num determinado nível da temperatura (T).
- (iv) O *critério de paragem* define quando o sistema 'congela'. Alguns dos critérios de paragem mais comuns são:
 - o número total de soluções candidatas geradas;
 - a temperatura mínima a ser atingida;
 - o valor mínimo da razão entre o número de soluções aceites e o número de soluções geradas.

Estes parâmetros são refinados de acordo com o problema específico a ser resolvido.

Os outros dois aspetos cuja definição é essencial para a aplicação deste algoritmo são:

- (i) a geração de uma solução inicial admissível;
- (ii) a geração das soluções vizinhas.

Tradicionalmente, estes dois aspetos eram resolvidos recorrendo-se à geração aleatória quer da solução inicial quer das soluções vizinhas. A única preocupação consistia em não violar as restrições do problema. Para o problema em questão, o algoritmo foi melhorado tendo sido desenvolvidas heurísticas para a resolução destas questões (ver secções 4.4.1 e 4.4.2).

4.4. Aplicação do algoritmo de arrefecimento simulado ao problema da formação de células de fabrico

Dada a natureza combinatoria do problema de formação de células de fabrico recorreu-se a uma metaheurística, neste caso o procedimento de arrefecimento simulado, para aplicar na sua resolução.

Nos próximos pontos serão explicados os diferentes aspetos e particularidades do algoritmo desenvolvido.

Tanto a solução inicial como as soluções vizinhas são geradas com base na matriz de fluxo entre operações. São, ainda, considerados dois parâmetros a definir pelo decisor:

- o número máximo de máquinas por célula (MC);
- o número máximo de células (C), que no limite pode ser igual ao número de máquinas disponíveis.

Estes parâmetros devem ser definidos de acordo com a situação específica que se pretende resolver, permitindo ainda ao decisor testar várias soluções de acordo com as alterações que deseje efetuar nestes parâmetros.

Para aplicar o algoritmo é, também, necessário recolher os seguintes dados:

- a matriz de fluxos entre operações, obtida a partir da sequência de operações e da procura de cada componente;
- o tipo de máquina utilizado por cada operação;
- a taxa de utilização da máquina por operação que corresponde ao quociente entre o tempo de processamento da operação (realizada em todos os componentes que necessitam desta operação) e a capacidade disponível, em termos temporais, de uma máquina do tipo necessário, ao longo do horizonte de planeamento.

4.4.1. Obtenção de uma solução inicial

O procedimento para a obtenção de uma solução inicial começa pela determinação de

uma afetação de operações a máquinas, de acordo com os seguintes passos:

1. Determinação do número de máquinas de cada tipo necessárias:

$$\left[\sum_{i=1}^O \alpha_{it} \right] \quad (t= 1, \dots, T) \quad (4.8)$$

2. Ordenação das operações por ordem decrescente da sua taxa de utilização (α_{it}) para cada tipo de máquina (t);
3. Seguindo a ordem definida no passo anterior, afetação sequencial das operações à máquina que, de entre as que têm capacidade disponível para processar a operação, tem maior capacidade disponível;
4. Se não existir nenhuma máquina com capacidade suficiente para processar a operação esta é dividida e a afetação é iniciada pela máquina com maior capacidade disponível. Quando a operação é dividida, o fluxo associado à mesma é dividido proporcionalmente à percentagem da operação que é processada nas máquinas resultantes da divisão.

A determinação da solução inicial conclui-se com o agrupamento das máquinas em células, tendo por base as operações afetadas a cada máquina e os fluxos existentes entre elas. Este procedimento começa por definir as máquinas nucleares, isto é, o conjunto de máquinas (uma por cada célula) que irão servir de base ao agrupamento das restantes máquinas e segue os passos que seguidamente se descrevem:

1. Seleciona, para primeira máquina nuclear, aquela que tem o maior fluxo absoluto com as restantes máquinas;
2. Para as restantes C-1 células seleciona, para máquina nuclear, aquela que, de entre as que ainda não foram afetadas, tem menor valor de fluxo com as máquinas nucleares já selecionadas. No caso de empate escolhe, de entre as máquinas não afetadas, a que tiver maior fluxo absoluto com todas as máquinas;
3. As máquinas restantes são afetadas sequencialmente de acordo com o critério do maior fluxo médio. Este valor é calculado para cada par máquina-célula através do quociente entre o fluxo da máquina com a célula e o número de máquinas já afetadas à célula. No caso de empate escolhe

aleatoriamente uma máquina.

4.4.2. Obtenção de soluções vizinhas

As soluções vizinhas são determinadas com base numa heurística com duas fases: inicialmente o algoritmo tenta mudar de célula a operação responsável pelo maior fluxo intercelular. Este passo é repetido até que se torne impossível mudar uma operação de célula, quer seja por não haver máquinas do tipo necessário nas outras células quer seja porque as que existem não têm capacidade disponível suficiente. Numa segunda fase, quando se verifica essa situação, o algoritmo procura mudar de célula a máquina responsável pelo maior fluxo intercelular. Este procedimento é efetuado de acordo com os seguintes passos:

1. Seleciona o par de operações responsável pelo maior fluxo intercelular;
2. Seleciona, de entre essas duas operações, a que se encontra afetada à máquina com menor capacidade disponível.
3. Seleciona a célula que contém as máquinas com as quais a operação escolhida tem o maior fluxo intercelular. Se na célula existir o tipo de máquina necessário para processar a operação com capacidade disponível suficiente para efetuar o processamento, muda a operação. Se houver mais do que uma máquina disponível na célula de destino da operação, esta é afetada à máquina que tiver mais capacidade disponível. No caso de não poder mudar a operação tenta mudar a outra operação do par escolhido anteriormente.
4. Repete os passos 2 e 3 até encontrar uma solução vizinha, selecionando o par de operações no passo 2 por ordem decrescente do fluxo intercelular gerado.
5. Se não for possível mudar nenhuma operação pertencente aos pares responsáveis pelo fluxo intercelular, segue para o passo 6.
6. Seleciona a máquina responsável pelo maior fluxo intercelular.
7. Muda a máquina selecionada para a célula com a qual tem maior fluxo intercelular absoluto, tendo em atenção a restrição do número máximo de máquinas por célula MC.

8. Caso a mudança da máquina não seja possível, repete-se o passo 7 até encontrar uma solução vizinha escolhendo a máquina por ordem decrescente do fluxo intercelular gerado.
9. No caso de não ser possível mudar nenhuma máquina para uma outra célula, executa o passo 10.
10. Gera uma 'solução vizinha' recorrendo ao procedimento de geração da solução inicial, sendo a primeira máquina nuclear escolhida de forma aleatória.

Cada solução que é gerada é avaliada com base no critério da ineficiência de fluxo definido por Heragu e Gupta (1994), que consiste no quociente entre o fluxo intercelular e o fluxo total. A ineficiência de uma solução tem por base o fluxo intercelular que esta apresenta, considerando que o objetivo base de um sistema de produção celular é a obtenção de células isoladas.

4.4.3. Parâmetros utilizados

Os parâmetros de controlo utilizados na implementação do algoritmo de arrefecimento simulado foram os seguintes (Vilarinho, 1997):

- (i) Temperatura inicial (T_0): A experiência computacional mostrou que a variação entre a ineficiência de fluxo de duas soluções vizinhas consecutivas nunca é superior a 10%. Deste modo, uma temperatura inicial de 50 garante que, pelo menos, 80% das soluções piores são aceites.
- (ii) Função de redução da temperatura: Utilizou-se a função geométrica com um fator de redução da temperatura de 0,9 ($T_i=0,9.T_{i-1}$).
- (iii) Comprimento do patamar (L): Um fator que influencia significativamente o esforço computacional é o número de fluxos intercelulares, o qual é da ordem de grandeza do número de operações. Deste modo, de maneira a restringir o esforço computacional à primeira ordem do fator dominante, o número de soluções testadas em cada patamar de temperatura foi definido como sendo $K \cdot O$, em que K é um fator definido pelo decisor ($K=1$ é o valor sugerido por defeito).

- (iv) Critério de paragem: Foram estabelecidos dois critérios alternativos. O primeiro define uma temperatura de ‘congelamento’ de 10, o que significa que são testados 16 patamares de temperatura ($T_0 \cdot a_i^{15} = 50 \cdot (0,9^{15}) = 10,29$). O segundo critério considera que se em cinco patamares consecutivos 85% das soluções geradas são rejeitadas, então a probabilidade de substituir a solução corrente é muito pequena e o procedimento termina.

4.4.4. Determinação das famílias de componentes

O procedimento descrito não define as famílias de componentes portanto, quando a solução final é encontrada, as máquinas encontram-se agrupadas e as operações afetadas, pelo que é necessário afetar os componentes às células existentes. Estes são afetados por ordem decrescente do número de operações a que são sujeitos. Os componentes são afetados à célula onde é executado o maior número das suas operações de processamento. No caso de empate o componente é afetado à célula que processa menos componentes.

4.4.5. Ilustração numérica

Os passos principais do algoritmo são seguidamente ilustrados com base num exemplo numérico. O exemplo apresentado requer quatro tipos de máquinas ($T=4$) para efetuar o processamento de dezasseis operações ($O=16$). Nas tabelas 4.1 e 4.2. apresentam-se, respetivamente, a taxa de utilização de cada operação por tipo de máquina e a matriz de fluxo entre operações.

Consideraram-se os seguintes valores para os parâmetros definidos pelo decisor:

- Número máximo de máquinas por célula, $MC=4$;
- Número máximo de células, $C=3$.

Tabela 4.1 - Tipos de máquinas e taxas de utilização das operações

Operação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Taxa de utilização (α_{it})	22,3	63,8	18,5	67,9	68,9	38,5	38,1	74,8	66,5	10,9	53,2	66,4	26,9	69,7	16,4	39,0
Tipo de máquina (t)	4	2	4	3	1	2	2	3	1	2	4	1	4	2	3	3

Tabela 4.2 - Matriz de fluxo entre operações

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1								112								
2					224											
3														123		
4											137					
5												190				
6			182													
7								227								
8												56				
9				113												
10							222									
11						85										
12													101			
13					209											
14										237						
15											59					
16												246				

O procedimento para a determinação da solução inicial começa por afetar as operações às máquinas. As máquinas do tipo 3, por exemplo, realizam as operações 4, 8, 15 e 16. A capacidade necessária é de 198,1% ($67,9+74,8+16,4+39$), o que indica que são necessárias duas máquinas do tipo 3. Do mesmo modo, para as máquinas do tipo 1, 2 e 4 são necessárias 3, 3 e 2 unidades, respetivamente.

Seguidamente o procedimento efetua a afetação das operações às máquinas. Retomando o tipo de máquina 3 como exemplo, e uma vez que a operação 8 tem a maior taxa de utilização (74,8%), é afetada à unidade 1 deste tipo de máquina. A operação 4, com a segunda maior taxa de utilização (67,9%), é afetada à unidade 2. A operação 16, com uma taxa de utilização de 39%, é a próxima a ser afetada, contudo a unidade 1 só tem 26,2% de capacidade disponível e a unidade 2, 32,1%. Isto leva a que a operação 16 seja dividida entre a unidade 1 e 2, ocupando primeiro a capacidade disponível na unidade 2 (uma vez que esta é a unidade com maior capacidade disponível). Por último a operação 15 é afetada à unidade 1, pois é a única com capacidade disponível.

O resultado da afetação das operações, para todos os tipos de máquinas, é apresentado na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Afetação das operações

Operação	5	9	12	14	2	6	7	10	8	4	16	15	11	13	1	3
Taxa de utilização (α_{it})	68,9	66,5	66,4	69,7	63,8	38,5	38,1	10,9	74,8	67,9	39,0	16,4	53,2	26,9	22,3	18,5
Tipo de máquina (t)	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
Máquina (m)	1	2	3	1	2	3	3	2	1	2	2	1	1	2	2	2
Capacidade disponível	31,1	33,5	33,6	30,4	36,2	61,5	23,4	25,3	25,2	32,1	0	1,9	46,8	73,1	50,9	32,4
Máquina (m)											1					
Capacidade disponível											18,3					

Com base nesta afetação e na matriz de fluxo entre operações apresentada na tabela 4.2, torna-se possível definir uma matriz de fluxo entre máquinas necessária para a aplicação do procedimento de agrupamento das máquinas.

Essa matriz de fluxo apresenta-se na tabela 4.4, onde os índices das linhas e colunas (i,j) representam a unidade j do tipo de máquina i, cada célula indica o fluxo entre o par de máquinas correspondentes e a última coluna (Total) indica o total do fluxo que passa por cada máquina. De notar que, a matriz é simétrica pois o que é representado é o fluxo entre máquinas, independentemente da direção deste. De realçar ainda que, uma vez que a operação 16 foi dividida, o fluxo correspondente também se encontra dividido, proporcionalmente, entre as máquinas (3,1) e (3,2).

Tabela 4.4 - Matriz de fluxo entre máquinas

	1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	4,1	4,2	Total
1,1			190		224					209	623
1,2				237			43	316			596
1,3	190						56			101	347
2,1		237								123	361
2,2	224					222	59				505
2,3					222		227	85	182		715
3,1		43	56		59	227				112	497
3,2		316							137		453
4,1						85		137			221
4,2	209		101	123		182	112				727

Após esta primeira fase, as máquinas são agrupadas de acordo com o procedimento definido anteriormente (secção 4.4.1.). A primeira máquina nuclear, a colocar na célula 1, é a máquina (4,2) pois apresenta o maior fluxo absoluto com as restantes máquinas. As máquinas que apresentam menor fluxo absoluto com a máquina (4,2) - as candidatas a

máquinas nucleares da célula 2 - são as máquinas (1,2); (2,2); (3,2) e (4,1), todas com fluxo nulo. Uma vez que existe um empate é escolhida a máquina que, de entre as anteriores, apresenta maior fluxo absoluto - máquina (1,2) - sendo afetada à célula 2. A última máquina nuclear é escolhida entre as máquinas 2,2 e 4,1, uma vez que ambas apresentam fluxos nulos com as máquinas afetadas anteriormente. A escolha baseia-se, mais uma vez, no maior fluxo absoluto, e recai sobre a máquina 2,2 que é, deste modo, afetada à célula 3.

Após a afetação das máquinas nucleares as máquinas restantes são afetadas sequencialmente de acordo com o critério do maior fluxo médio. Na tabela 4.5 apresenta-se o fluxo médio das diversas máquinas não afetadas com as três células. De notar que, neste caso, o fluxo médio é igual ao fluxo absoluto, uma vez que cada célula, neste momento, apenas contém uma máquina.

Tabela 4.5 - Fluxo médio para cada máquina não afetada (primeira iteração)

		Célula		
		1	2	3
		Nº de máquinas na célula		
		1	2	1
Máquinas não afetadas	1,1	209	0	224
	1,3	101	0	0
	2,1	123	237	0
	2,3	182	0	222
	3,1	112	43	59
	3,2	0	316	0
	4,1	0	0	0

A primeira máquina a ser afetada é a máquina (3,2) à célula 2. A escolha é feita com base no valor do fluxo absoluto das máquinas não afetadas com cada uma das máquinas nucleares. Para a segunda escolha, o cálculo do fluxo médio de cada máquina não afetada é apresentado na tabela 4.6.

A máquina escolhida é a (1,1) sendo afetada à célula 3. Este passo é repetido até todas as máquinas se encontrarem afetadas.

Tabela 4.6 - Fluxo médio para cada máquina não afetada (segunda iteração)

		Célula	1	2	3
		Nº de máquinas na célula	1	2	1
Máquinas não afetadas	1,1	209	0	224	
	1,3	101	0	0	
	2,1	123	119	0	
	2,3	182	0	222	
	3,1	112	22	59	
	4,1	0	69	0	

O resultado final do passo anterior, e como tal a solução inicial do procedimento de arrefecimento simulado, é o seguinte:

Tabela 4.7 - Composição das células

Célula	Máquinas			
1	4,2	2,3	3,1	
2	1,2	3,2	2,1	4,1
3	2,2	1,1	1,3	

Na tabela 4.8 apresenta-se a matriz de fluxo entre operações rearranjada na forma de diagonal por blocos (MDB - Matriz Diagonal por Blocos), de maneira a evidenciar a afetação das operações às máquinas e destas às células. A terceira linha da tabela indica a capacidade disponível de cada máquina.

Outro aspeto essencial do algoritmo é a forma como vão sendo criadas novas soluções. A partir da solução inicial, obtida no passo anterior, é possível exemplificar a forma como as soluções vizinhas são construídas.

O par de operações que origina o maior fluxo intercelular é então identificado, trata-se do par (10,7), com um fluxo de 222. Para reduzir o fluxo intercelular, escolhe-se a operação 7 (realizada na unidade 3 do tipo de máquina 2) e muda-se para a célula 3, uma vez que a máquina (2,3) tem menos capacidade disponível (23,4%) que a máquina (2,2) - onde é efetuada a operação 10 (25,3%). Contudo, a operação 7 não pode ser movida para a célula 3 pois esta célula, apesar de ter uma máquina do tipo necessário (máquina (2,2) com 25,3% de capacidade disponível) esta não tem a capacidade necessária disponível dado que a operação 7 precisa de 38,1% de capacidade disponível, como se pode ver na

tabela 4.1.

Tabela 4.8 - Matriz de fluxo entre operações para a solução inicial na forma MDB

Célula	1						2				3						
Máquina	4,2		2,3		3,1		1,2	3,2		2,1	4,1		2,2	1,1	1,3		
Capacidade disponível	32,4		23,4		1,9		33,5	0		30,4	46,8		25,3	31,1	33,6		
Operação	1	3	13	6	7	8	15	16	9	4	16	14	11	2	10	5	12
1	112																
3							123										
13											209						
6	182																
7					227												
8																	
15											59						
16							43										
9							113										
4											137						
16							203										
14							237										
11			85														
2											224						
10			222														
5																	
12	101																

Quando se atinge uma situação em que todos os pares de operações responsáveis por fluxo intercelular foram testados e não é possível mudar nenhuma operação de célula pode-se calcular o fluxo entre as máquinas, para a solução corrente, e tentar diminuir o fluxo intercelular mudando uma máquina de célula (escolhendo por ordem decrescente de fluxo intercelular e garantindo que não se viola a restrição do máximo número de máquinas por célula). Na tabela 4.9 mostra-se a matriz de fluxo entre máquinas para uma possível situação desse tipo:

Tabela 4.9 - Matriz de fluxo entre máquinas na forma MDB

Células Máquinas	1		2				3			
	2,3	3,1	1,2	2,1	3,2	4,1	1,1	1,3	2,2	4,2
2,3	286		267							
3,1	286		44				56		112	
1,2		44	237 315							
2,1			237			123				
3,2			315			137				
4,1	267			123	137					
1,1							190	224	209	
1,3		56					190		101	
2,2							224			
4,2		112					209	101		

As máquinas (2,3) e (4,1) são responsáveis pelo maior fluxo intercelular (no valor de 267 unidades). A máquina (2,3) não pode ser mudada para a célula 2 pois viola a restrição do máximo número de máquinas por célula (4 máquinas), contudo a máquina (4,1) pode ser mudada para a célula 1. A mudança é feita e uma solução vizinha é gerada. De notar que, para gerar a solução vizinha seguinte, haverá a tentativa de mudar novamente operações de célula e não máquinas.

De notar que, a solução inicial, deste exemplo, apresenta uma ineficiência de fluxo (fluxo intercelular / fluxo total) de 35,6% (ver tabela 4.8) e a melhor solução obtida, resultante da aplicação do procedimento de arrefecimento simulado, tem uma ineficiência de fluxo de 8,4%.

4.4.6. Experiência computacional

O número limitado de artigos publicados que tratam do problema de formação de células de fabrico com a presença de várias máquinas funcionalmente idênticas e que procuram minimizar o fluxo intercelular, limita a comparação do desempenho da heurística proposta. Contudo, adaptaram-se três exemplos propostos por Wu e Salvendy (1999) de maneira a ser possível aplicar-lhe a heurística. Os dados apresentados nesse artigo não consideravam operações de fabrico, sendo as sequências de fabrico definidas apenas com base no tipo de máquina necessária para cada operação. Assim, para definir as operações por forma a aplicar o procedimento de arrefecimento simulado, foi assumido que cada componente, ao utilizar uma máquina, faria uma operação específica, não

havendo operações comuns a vários componentes. Naturalmente essa simplificação limita as possibilidades de comparação entre procedimentos.

Os problemas apresentavam dimensões diferentes contemplando, respetivamente, 6, 13 e 22 componentes; 8, 13 e 22 tipos de máquinas e 10, 18 e 23 máquinas. As melhores soluções obtidas para os três exemplos testados foram iguais, em termos de fluxo intercelular, às soluções apresentadas no citado artigo, sendo o tempo de computação bastante reduzido (menos de 10 segundos).

Para validar a heurística proposta, de uma outra forma, recolheram-se dados referentes a parte de uma unidade industrial que fabrica componentes para a indústria automóvel, e que se encontra organizada em células de fabrico. O estudo envolveu uma secção da fábrica que inclui 38 unidades de 21 tipos diferentes de máquinas, que realizam 140 operações em 15 componentes distintos, fabricando cerca de 14.000.000 unidades/ano. A organização do processo produtivo é híbrida, coexistindo células de fabrico com departamentos organizados por processo. A implantação atual (figura 4.3) inclui três células de fabrico e uma máquina gargalo por onde todos os componentes são obrigados a passar antes de serem transportados para o bloco final onde são efetuadas as operações finais de todos os componentes.

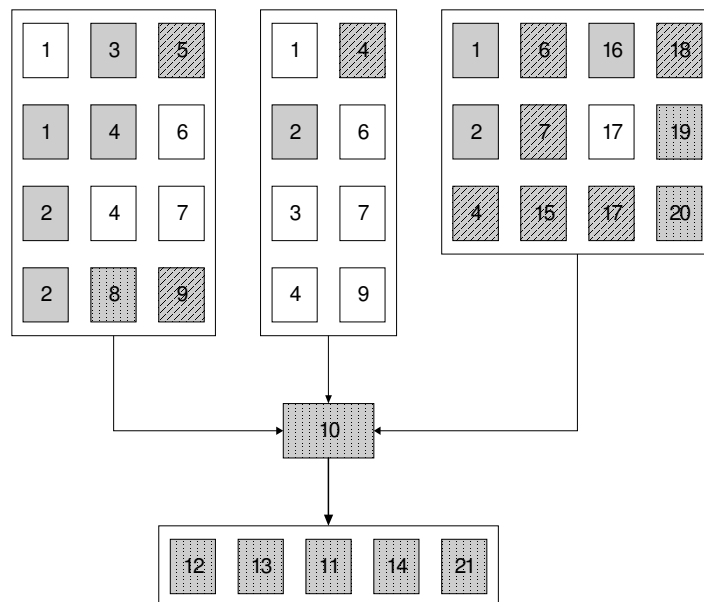


Figura 4.3 - Implantação inicial simplificada

A nova implantação, obtida a partir da aplicação da heurística, utiliza apenas as máquinas apresentadas a sombreado, dividindo-as por três células (ver figura 4.4), o que significa uma redução de cerca de 30% em termos do número de equipamentos utilizados. Adicionalmente esta implantação apresenta um melhor resultado em relação à ineficiência de fluxo. Este resultado, contudo, não foi implementado, uma vez que se considerou apenas parte da implantação e, por exemplo, a máquina gargalo é utilizada por outros componentes que não os analisados. Não obstante, a experiência permitiu comprovar que a heurística apresenta um bom desempenho mesmo para problemas de grandes dimensões, apresentando um tempo de computação inferior a 5 minutos.

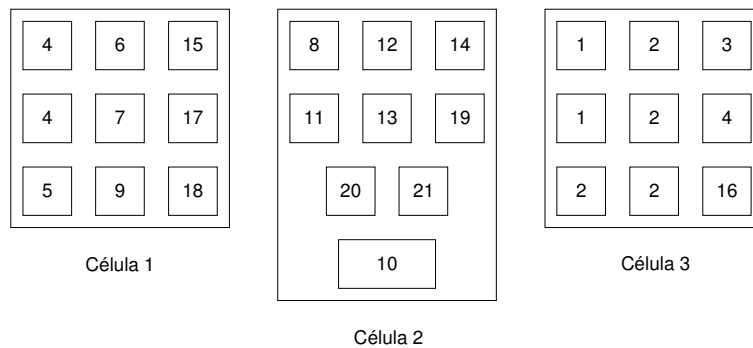


Figura 4.4 - Implantação gerada

4.5. Balanceamento de células de fabrico

Como já se referiu anteriormente, um sistema de produção celular pode ser encarado como um sistema híbrido que apresenta características semelhantes a um sistema organizado por processo ao nível da implantação intercelular e características de um sistema organizado por produto ao nível da implantação intracelular. Na maioria dos sistemas de produção celulares, o padrão do fluxo dos componentes dentro de cada célula não é, normalmente, unidirecional e, por outro lado, a produção é efetuada como numa linha assíncrona, isto é, não existe um tempo predeterminado para cada recurso terminar de realizar as tarefas que lhe foram afetadas. Estes aspetos condicionam a forma como pode ser feita a distribuição das tarefas pelos recursos existentes nas células (máquinas e operadores).

Assim, efetuar o balanceamento da célula (linha de produção) em que a carga horizontal (entre todos os recursos) e vertical (entre recursos do mesmo tipo) está adequadamente distribuída é um fator crucial para o desempenho da mesma.

A maioria dos estudos realizados na área das linhas assíncronas é direcionada para o caso em que existe apenas um tipo de recurso na linha, mais especificamente trabalhadores em linhas de montagem (e.g. Malakooti, 1994; Jeong e Kim, 2000; Chiang *et al.*, 2012; Hillier, 2013). A ênfase recai no dimensionamento dos *buffers* de material colocados entre os postos, sempre com o pressuposto de se tratarem de linhas em série, ou seja, em que o fluxo dos produtos é unidirecional (Dallery e Le Bihan, 1999; Chan e Ng, 2002; Sabuncuoglu, 2006; Vergara e Kim, 2009). Há também alguma preocupação em avaliar e comparar o desempenho desse tipo de linha (assíncrona) com outras possíveis formas de organização de uma linha (Chakravorty e Atwater, 1996; Chiang *et al.*, 2012; McNamara *et al.*, 2013).

O balanceamento de linhas de produção não tem sido muito relacionado com os sistemas de produção celulares e, quando é considerado nesse contexto (e.g. Gung e Steudel, 1999), trata do dimensionamento de lotes e *buffers* e da redução dos tempos de preparação dos equipamentos, já na fase operacional do sistema, assumindo que a constituição das células de fabrico encontra-se totalmente definida.

Com o intuito de aprofundar o estudo do problema do balanceamento intracelular no contexto do planeamento de células de fabrico, desenvolveu-se um novo procedimento.

Na secção seguinte apresenta-se o algoritmo desenvolvido para o balanceamento de células de fabrico, baseado no procedimento de arrefecimento simulado, e que considera os seguintes aspetos:

- o balanceamento da linha de produção ao fazer a afetação das operações aos recursos (operadores ou equipamentos) considerando o equilíbrio da carga de trabalho em cada recurso,
- a redução dos *buffers* ao longo da linha, como consequência do adequado balanceamento da mesma.

4.5.1. Algoritmo para o balanceamento de células de fabrico

No desenvolvimento deste algoritmo assumiram-se o seguinte conjunto de pressupostos:

- a sequência de processamento de cada componente é conhecida;
- o tamanho do lote de produção considerado é definido como o mínimo múltiplo comum entre as dimensões dos lotes das diferentes operações de processamento;
- o tempo de processamento (t_i) para cada operação ($i=1, \dots, T$) é conhecido, bem como o(s) recurso(s) requerido(s) para o processamento dos componentes;
- a produção dos componentes utiliza um conjunto de recursos ($r=1, \dots, R$) classificados como trabalhadores ou equipamentos, mais especificamente poderão existir trabalhadores com determinadas qualificações e equipamentos de diferentes tipos;
- o número de recursos disponíveis, para cada tipo de recurso (R), é M_r ($m=1, \dots, M_r$);
- o tempo de ciclo C é definido de acordo com a procura, dado um certo horizonte de planeamento, desde que $C \geq \max\{t_i\}$ caso contrário será $C = \max\{t_i\}$;
- o conjunto de operações que não podem ser realizadas antes de uma operação i (S_i - sucessoras da operação i) é definido tendo em conta as

restrições de precedência do processo produtivo;

- uma tarefa sucessora da tarefa i não pode ser afetada antes desta;
- cada tarefa/operação só pode ser afetada a uma unidade de um determinado tipo de recurso;
- as T operações diferentes podem ser realizadas em componentes diferentes.

Considerando as seguintes variáveis de decisão,

$$x_{imr} = \begin{cases} 1, & \text{se a operação } i \text{ for afectada ao } m\text{-ésimo recurso do tipo } r \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

a função objetivo pode ser definida do seguinte modo:

$$\text{Min } Z = \frac{1}{K} \sum_{r=1}^R I_r + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \left(\frac{M_r}{M_r - 1} \cdot \sum_{m=1}^{M_r} \left(\frac{i_{mr}}{I_r} - \frac{1}{M_r} \right)^2 \right) + \left(\frac{K}{K - 1} \cdot \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^{M_r} \left(\frac{i_{mr}}{\sum_{r=1}^R I_r} - \frac{1}{K} \right)^2 \right) \quad (4.9)$$

O primeiro termo da expressão mede o total de tempo inativo em cada tipo de recurso, no qual:

- $I_r = M_r \cdot C - \sum_{i=1}^T \sum_{m=1}^{M_r} t_i \cdot x_{imr}$ representa a diferença entre o tempo disponível em cada tipo de recurso e o tempo utilizado na realização das operações e
- $K = \sum_{r=1}^R M_r$, representa o número total de recursos utilizados na linha de produção.

A minimização do primeiro termo, tempo inativo médio, é equivalente à minimização do número de recursos utilizados na linha.

O segundo termo da expressão mede o equilíbrio da carga de trabalho entre as diferentes unidades do mesmo tipo de recurso. Este termo teve por base os conceitos utilizados no balanceamento das linhas de montagem, nomeadamente a função objetivo do modelo proposto por Simaria e Vilarinho (2001), naturalmente adaptado para uma situação em que existem diferentes tipos de recursos. Se, para um dado tipo de recurso,

existe apenas uma unidade não é necessário verificar o equilíbrio da carga, pelo que este termo será nulo.

Neste termo da expressão (4.9):

$$- I_r = M_r \cdot C - \sum_{i=1}^T \sum_{m=1}^{M_r} t_i \cdot x_{imr}, \text{ mede, como foi referido anteriormente, o tempo total inativo para cada tipo de recurso e}$$

$$- i_{mr} = C - \sum_{i=1}^T t_i \cdot x_{imr}, \text{ representa o tempo inativo da unidade } m \text{ do recurso tipo } t.$$

Finalmente, o terceiro termo utiliza uma lógica semelhante à do segundo termo, para medir o balanceamento das cargas entre todos os recursos utilizados na linha. Ao utilizar este terceiro termo, dá-se preferência às soluções em que a carga está distribuída de forma mais equilibrada entre os recursos da célula. Uma solução mais equilibrada irá permitir a utilização de *buffers* de materiais de menor dimensão pois não haverá recursos sobrecarregados e outros com excesso de trabalho.

A partir do desenvolvimento da função objetivo, construiu-se um procedimento que tem por base a metaheurística de arrefecimento simulado.

O procedimento utilizado baseia-se no algoritmo de arrefecimento simulado e difere do apresentado na secção 4.4. apenas na forma como é definida a solução inicial e como são geradas as soluções vizinhas.

Assim, a solução inicial, a partir da qual se inicia a pesquisa de melhores soluções, é gerada utilizando uma heurística *greedy*. A solução é construída selecionando a operação que, de entre as que podem ser afetadas ao recurso por não violarem as restrições de precedência nem ultrapassarem o tempo disponível no recurso, tem maior tempo de processamento.

Quanto às soluções vizinhas, estas são geradas aleatoriamente de duas formas: (i) escolhe-se uma operação aleatoriamente e muda-se para outra unidade do mesmo tipo de recurso, também selecionada aleatoriamente de entre os com capacidade disponível, ou (ii) escolhem-se aleatoriamente duas operações que trocam de recurso entre si. Cada um destes tipos de movimento tem 50% de probabilidade de ocorrer.

Esta forma aleatória de gerar as soluções vizinhas pode dar origem a soluções não

admissíveis (devido às restrições de precedência) o que obriga a verificar a admissibilidade de cada solução.

O critério de paragem utilizado considera que, se em cinco patamares de temperatura seguidos, 85% ou mais das soluções geradas são rejeitadas, então a probabilidade de encontrar uma solução melhor é extremamente reduzida e o procedimento deve parar.

4.5.2. Ilustração numérica

Para melhor ilustrar o funcionamento do procedimento, é apresentado um exemplo com 10 operações diferentes, as quais requerem 5 tipos diferentes de recursos (tipos de equipamentos A, B, C e D e trabalhadores com nível de qualificações W). O diagrama de precedências entre as diferentes operações é representado pelo grafo que se apresenta na figura 4.5.

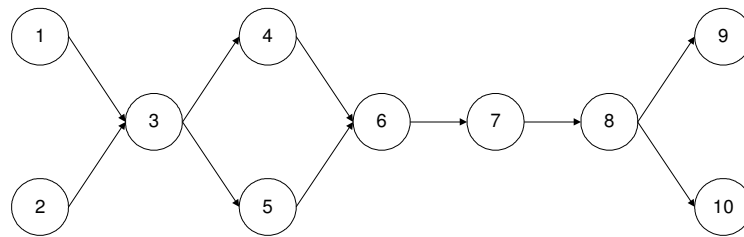


Figura 4.5 - Diagrama de precedências

Na tabela 4.10 apresenta-se a informação relevante para o problema em causa.

Tabela 4.10 - Informação sobre as operações consideradas no exemplo numérico

Operação (i)	Tipo de recurso (r)	Lote	Tempo de processamento por lote (segundos)	t_i
1	A	10	30	60
2	B	20	40	40
3	W	1	3	60
4	A	10	5	10
5	A	1	2	40
6	B, W	1	1,5	30
7	C	4	12	60
8	D	20	50	50
9	W	1	2	40
10	C	10	35	70

m.m.c.=20

Considerando que o tempo de ciclo, C , é de 75 segundos, a aplicação da heurística *greedy* conduziu à solução inicial que se apresenta na tabela 4.11 e cuja representação gráfica se exhibe na figura 4.6.

Tabela 4.11 - Solução inicial para o problema de balanceamento

Operação disponível	Operação escolhida	Tipo de recurso (r)	Número do recurso (m)	Tempo inativo (i_{mr})
1, 2	1	A	1	15
2	2	B	1	35
3	3	W	1	15
4, 5	5	A	2	35
4	4	A	2	25
6	6	B	1	5
		W	2	45
7	7	C	1	15
8	8	D	1	25
9,10	10	C	2	5
9	9	W	2	5

Os valores do tempo inativo em cada recurso estão realçados na última coluna da tabela 4.11. Os valores correspondentes serão utilizados para avaliar a qualidade da solução obtida em termos do número de recursos utilizados (balanceamento vertical entre recursos do mesmo tipo) e também ao nível do balanceamento entre todos os recursos utilizados (balanceamento horizontal).

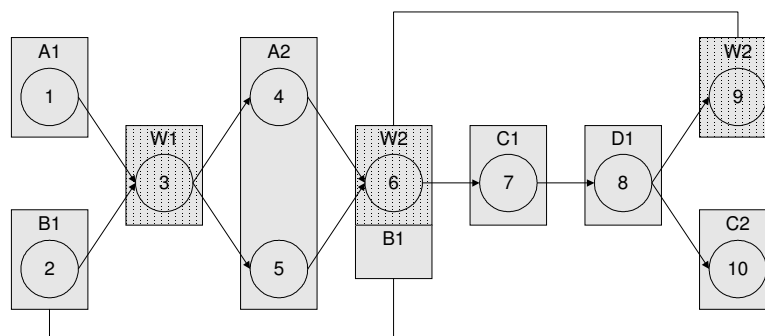


Figura 4.6 - Representação da solução inicial

Para esta solução o valor da função objetivo é de 13,911 (sendo $R=5$, $\sum M_r=8$, $\sum I_r=110$ e os valores de i_{mr} os apresentados na tabela 4.11.).

Esta solução pode facilmente ser alterada transferindo ou trocando operações entre recursos do mesmo tipo. Isto permitirá a evolução do algoritmo que, por recorrer ao

algoritmo de arrefecimento simulado, consegue testar um conjunto alargado de soluções.

4.5.3. Experiência computacional

O procedimento foi testado utilizando as instâncias, para o problema de balanceamento de linhas de montagem, fornecidas em Scholl (1993) e Scholl (1999), tendo sido aproveitados os diagramas de precedências das tarefas, assim como os tempos das mesmas. Para adequar as instâncias ao problema de balanceamento de linhas de produção foi necessário definir, para cada tarefa, qual ou quais os recursos necessários para a sua execução, nomeadamente trabalhadores e equipamentos.

Foram, assim, testados oito problemas com dimensões diferentes (entre 8 e 70 operações de fabrico) tendo sido efetuadas 10 experiências para cada problema, exceto para o primeiro (de menor dimensão) em que apenas se realizaram três. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resultados da experiência computacional

Dimensão do problema (nº de operações)	Valor médio da função objetivo	Desvio padrão da função objetivo	Valor mínimo da função objetivo	Valor máximo da função objetivo	Valor médio de melhoramento da função objetivo (%)
8	1,150	0,000	1,150	1,150	0%
21	0,723	0,041	0,659	0,781	12%
28	0,745	0,044	0,684	0,793	5%
30	0,767	0,106	0,617	0,928	29%
32	0,826	0,091	0,697	0,947	15%
35	0,663	0,035	0,616	0,740	10%
45	0,866	0,019	0,833	0,883	2%
70	0,560	0,069	0,484	0,680	25%

Verifica-se que o algoritmo consegue melhorar o valor da função objetivo em relação à solução inicial, excepto para o primeiro problema, de pequena dimensão, cuja solução final foi igual à construída pela heurística do maior tempo de processamento.

Para uma das experiências do problema de maior dimensão apresenta-se ainda o gráfico de convergência do algoritmo (ver figura 4.7), representando o valor da função objetivo, assim como dos três termos que a constituem, das soluções aceites pelo procedimento de arrefecimento simulado. Nesse gráfico é possível visualizar a evolução desses valores

até um ponto estável que corresponde ao valor da função objetivo da solução final, sendo de notar que, neste exemplo, esse valor melhorou em cerca de 35%.

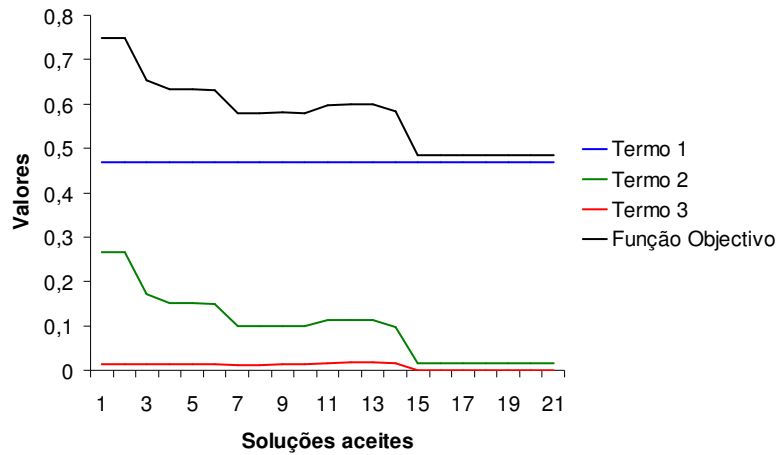


Figura 4.7 - Gráfico de convergência do algoritmo

Os testes realizados permitiram ainda verificar que o procedimento é eficiente e converge rapidamente estando os tempos de computação sempre abaixo dos 1,5 segundos.

4.6. Conclusões

Neste capítulo foi proposto um modelo de programação matemática para o problema da formação de células de fabrico considerando a existência de várias unidades de equipamentos funcionalmente idênticos. O modelo tem como objetivo a minimização do fluxo intercelular considerando, para isso, o volume de fluxo entre operações.

Dada a natureza combinatória do problema foi ainda desenvolvido um procedimento de arrefecimento simulado que foi aplicado a problemas adaptados de Wu e Salvendy (1999) e a um caso real.

Os testes realizados permitiram confirmar o bom desempenho da heurística proposta, mesmo para problemas de grandes dimensões. O esforço computacional é reduzido, o que confirma a eficiência da heurística.

Considera-se ainda que o procedimento proposto é eficiente em termos do objetivo considerado: minimização do fluxo intercelular. A utilização de uma matriz de fluxo entre operações revelou-se uma abordagem bastante positiva pois permitiu resolver o problema da afetação das operações conjuntamente com a definição da constituição das células. Adicionalmente facilitou utilizar, no procedimento, como objetivo uma medida do fluxo entre células. A possibilidade de utilizar esta mesma estrutura de dados recorrendo a outros tipos de pesquisa combinatória abre uma série de novas oportunidades de exploração desta questão.

A aplicação da heurística a um problema industrial mostrou que a pesquisa futura deverá incidir também em questões como: (i) restringir máquinas a células específicas, (ii) duplicação de máquinas e (iii) pré-definição do número de unidades existentes para cada tipo de máquina.

O problema de balanceamento tem recebido muita atenção, quando aplicado a linhas de montagem. A sua análise no contexto das células de fabrico (que podem ser tratadas como linhas de produção assíncronas) é, contudo, menos comum. Desenvolveu-se um algoritmo para este problema que contempla as condicionantes específicas do problema de balanceamento de linhas de produção.

O trabalho futuro deverá incluir o teste do procedimento com dados de um problema real. Paralelamente existem problemas correlacionados que devem ser considerados, por exemplo, a definição da forma de implantação de linha (célula em U, em linha, ...) por

forma a minimizar o espaço ocupado e/ou a distância percorrida pelos componentes e trabalhadores.

Por exemplo, a figura seguinte mostra uma possível configuração para a solução inicial apresentada anteriormente, na ilustração numérica.

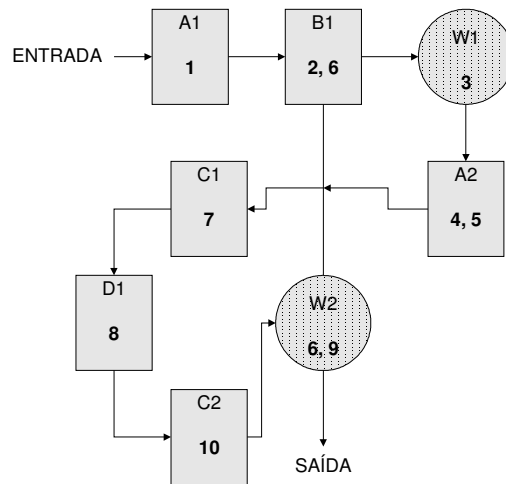


Figura 4.8 - Possível configuração da célula

Uma outra questão importante é o modo como o sequenciamento, o tamanho do lote produtivo e os tempos de preparação dos equipamentos para mudança de produto afetam o desempenho da linha, particularmente ao nível da dimensão dos *buffers*. A utilização de um modelo de simulação que permita estudar esta questão é uma outra possibilidade em termos de trabalho futuro.

Como foi dito anteriormente o procedimento apresentado é uma primeira abordagem ao problema, contudo foi desenvolvido de forma a poder ser facilmente adaptado a diferentes tipos de linhas de produção, quer estejam ou não na forma de uma célula de fabrico.

5

Desenvolvimento de Algoritmos para a Formação de Células de Fabrico Virtuais

Conteúdo

- Introdução
- Algoritmos genéticos
- Algoritmo genético para o problema da formação de células de fabrico virtuais
- Algoritmo genético para o problema da formação de células de fabrico virtuais numa implantação distribuída
- Conclusões

5.1. Introdução

Os sistemas de produção celulares surgiram como uma alternativa para a organização dos sistemas de produção em ambientes fabris de produção por lotes, apresentando diversas vantagens relativamente aos sistemas de produção por processo, como já foi referido no capítulo 2.

Os sistemas de produção celulares exploram as semelhanças entre os processos de produção dos componentes neles processados, ao agrupar os recursos de produção em células de fabrico, cada uma dedicada à produção de uma família de componentes com requisitos de processamento semelhantes.

Existem, basicamente, duas formas de implementar um sistema de produção celular (SPC): física e lógica. No primeiro caso as máquinas são dispostas no espaço fabril formando células dedicadas e de maneira a obter uma eficiência, no processamento dos componentes, semelhante à que se conseguiria numa *flow-shop*.

A implementação física de um sistema de produção celular resulta ainda num elevado nível de eficiência em termos de tempos de preparação (Kannan, 1997), mas o uso de equipamento dedicado também apresenta alguns problemas, nomeadamente custos elevados de investimento, reduzida utilização da capacidade instalada e reduzida flexibilidade para a definição de rotas alternativas (Mertins *et al.*, 2000).

Quando os grupos são apenas lógicos, a implantação fabril permanece organizada por processo, sendo os equipamentos agrupados virtualmente, ficando assim dedicados ao processamento de uma família de componentes. Estes sistemas são conhecidos como Sistemas de Produção Celulares Virtuais (SPCV).

O conceito das células virtuais permite manter as eficiências em termos de tempos de preparação sem perder a flexibilidade inerente a um sistema organizado por processo (Drolet *et al.*, 1989). Num SPCV os equipamentos e os componentes são agrupados em células, tal como num SPC tradicional, mas, como a implantação fabril base continua organizada por processo, as células podem ser reconfiguradas quando ocorrem alterações na procura, sem que seja necessário efetuar qualquer alteração física da implantação. As vantagens que se obtêm com este tipo de célula derivam da dedicação dos equipamentos a famílias de componentes e passam pela redução dos tempos de tempo de preparação e simplificação dos fluxos de materiais, mantendo a flexibilidade de

um sistema organizado por processo.

Neste capítulo é abordado o problema da formação de células de fabrico virtuais, ou seja o da definição da composição das células virtuais, sendo proposta uma heurística baseada em algoritmos genéticos para a resolução deste problema que considera um duplo objetivo: (i) a redução dos tempos de preparação dos equipamentos, através da escolha, para a mesma família, de componentes com sequências de processamento semelhantes e (ii) o equilíbrio das cargas de trabalho entre equipamentos do mesmo tipo. A função objetivo do algoritmo foi, posteriormente, alterada através do desenvolvimento de um novo coeficiente de semelhança, utilizado para a formação das famílias de componentes.

Por último, é apresentada uma outra heurística, também baseada em algoritmos genéticos, que procura resolver o problema da formação de células virtuais mas tendo por base uma implantação fabril distribuída ao invés de uma organizada por processo. Numa implantação fabril distribuída os equipamentos não estão agrupados em departamentos funcionais mas encontram-se dispersos pela área fabril de uma forma aleatória.

5.2. Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são procedimentos iterativos de pesquisa que têm por base o processo biológico de seleção natural e herança genética. Esta adaptação de um conjunto de conceitos da biologia e genética a um procedimento de pesquisa foi proposta por Holland (1975).

De uma forma simplificada, os algoritmos genéticos partem da geração de um conjunto ou população de indivíduos, que correspondem a diferentes soluções para o problema a resolver. Os indivíduos desta população sofrem posteriormente uma série de transformações ao longo de diversas gerações: A ideia base é que as características dos 'melhores' indivíduos sejam mantidas entre cada geração e que os elementos da população sejam aperfeiçoados até que se obtenha um indivíduo que represente a solução ótima ou uma solução quasi-ótima.

Segundo Falkenauer (1999) a aplicação de algoritmos genéticos a problemas de otimização envolve oito passos básicos:

- (i) Codificação: o conjunto de parâmetros que define uma solução no espaço de soluções do problema a ser resolvido pelo algoritmo genético designa-se por cromossoma, o qual deve ser codificado num formato que permita a sua manipulação numérica, tipicamente uma cadeia de caracteres binários. Cada cromossoma representa um indivíduo, ou seja, uma solução para o problema. Idealmente dever-se-á optar por uma codificação do tipo 'um-para-um', em que cada cromossoma só representa uma solução e cada solução só pode ser representada por um cromossoma. Dado que os algoritmos genéticos operam com os cromossomas e não com as soluções propriamente ditas, a quantidade de informação a processar é substancialmente reduzida, uma vez que somente é necessário processar as representações das diferentes soluções em análise.
- (ii) Inicialização: os algoritmos genéticos requerem a definição de uma população inicial de indivíduos. A dimensão desta população depende da natureza do problema, mas tipicamente contém centenas de soluções possíveis. Tradicionalmente, a população inicial é gerada de uma forma aleatória criando uma série de soluções alternativas, o que permite a pesquisa, em paralelo, de vários pontos do espaço de soluções.

- (iii) Avaliação: a qualidade de cada solução é avaliada pelo valor de *fitness* de cada indivíduo. Este valor é definido por uma função *fitness* que, traduzindo, de algum modo, a função objetivo do problema, permite comparar a qualidade da solução associada a cada indivíduo.
- (iv) Seleção: uma parte da população de uma geração é selecionada para criar a geração seguinte dessa população. Os indivíduos são selecionados por um processo que tem em conta o seu valor de *fitness*, atribuindo maior probabilidade de escolha aos indivíduos que representam as melhores soluções. Tradicionalmente o processo de seleção é aleatório (*noisy selection*), o que possibilita que alguns dos indivíduos com menor valor de *fitness* sejam selecionados, impedindo assim a convergência prematura do algoritmo para ótimos locais.
- (v) Reprodução/Recombinação: a criação de uma nova geração da população utiliza operadores genéticos que têm por objetivo melhorar o valor de *fitness* dos indivíduos da nova geração. No processo de recombinação (*crossover*) os indivíduos selecionados formam um conjunto de progenitores que serão cruzados (*crossed over*) dando origem a um conjunto de novos indivíduos (filhos). Neste processo procura-se recombinar partes diferentes dos cromossomas dos pais de maneira a que os filhos apresentem características diferentes.
- (vi) Reprodução/Seleção: por vezes é feita uma nova seleção aleatória, desta vez enviesada para o lado da população com piores valores de *fitness*. Os indivíduos escolhidos são substituídos por elementos do conjunto dos progenitores que, juntamente com os filhos, resultam numa nova população.
- (vii) Reprodução/Mutação: esta nova população é então sujeita a mutações. Alguns indivíduos são selecionados aleatoriamente e sofrem pequenas alterações dando origem a soluções ligeiramente diferentes. Também pode ser aplicado um operador de inversão em que se modifica a ordem do cromossoma. O objetivo deste procedimento de mutação é o de manter a diversidade genética entre as gerações da população, o que permite ao algoritmo genético evitar os mínimos locais, uma vez que impede que as populações de indivíduos de diferentes gerações se tornem muito semelhantes e atrasem (ou parem) a evolução.

- (viii) Paragem: este processo geracional é repetido até que seja atingida uma condição de paragem (usualmente um número máximo de gerações ou um determinado número de gerações sem melhoria do *fitness* do melhor indivíduo).

Estando, nesta fase, a nova população completamente formada repete-se o processo de pesquisa a partir do ponto (iii) até se atingir o critério de paragem, ou seja, até o procedimento estabilizar.

Este procedimento corresponde ao processo geral subjacente aos algoritmos genéticos (algoritmos genéticos geracionais) em que são mantidas duas populações: a corrente e a futura, propostos por Holland (1975).

A pesquisa que tem sido feita nesta área tem originado um conjunto de alternativas diferentes para alguns dos principais pontos apresentados. Na aplicação de algoritmos genéticos a alguns dos problemas tratados neste trabalho foram utilizadas algumas dessas alternativas. Nas próximas secções e capítulos são explicadas e justificadas as opções por operadores genéticos (de reprodução, recombinação ou *crossover* e mutação) diferentes e um processo de seleção e classificação da população não completamente aleatório (*tournament selection*).

5.3. Algoritmo genético para o problema da formação de células de fabrico virtuais

O problema da formação de células de fabrico virtuais consiste na definição de famílias de componentes com requisitos de processamento semelhantes e na afetação dessas famílias a máquinas específicas, de maneira a conseguir reduzir os tempos de preparação dos equipamentos e a equilibrar a carga de trabalho entre equipamentos do mesmo tipo. Um aspeto a realçar é que se admite que a mesma máquina pode processar componentes de mais do que uma família desde que, naturalmente, não se ultrapasse a capacidade do equipamento em questão. Deste modo, evita-se a subutilização dos equipamentos que, no caso de sistemas de produção celulares tradicionais, ocorre pela necessidade de duplicar equipamentos para evitar fluxos intercelulares.

Nesta secção é apresentada uma heurística para o problema da formação de células de fabrico virtuais, a qual assenta no seguinte conjunto de pressupostos:

- (i) o volume de produção é estável ao longo do tempo,
- (ii) o volume global de produção pode ser adequadamente representado por um conjunto limitado de componentes (P) produzidos de acordo com uma sequência de processamento conhecida e em quantidades determinadas para um dado horizonte de planeamento,
- (iii) cada uma das O operações de fabrico ($i=1, \dots, O$) pode ser realizada em mais do que um componente ($p=1, \dots, P$), sendo o tempo de preparação do equipamento necessário para realizar essa operação o mesmo, independentemente do componente onde irá ser realizada,
- (v) a produção é efetuada num conjunto de diferentes tipos de máquinas ($t=1, \dots, T$), classificadas de acordo com as suas funcionalidades,
- (vi) cada operação pode ser realizada em diferentes unidades de máquinas de um mesmo tipo ($m=1, \dots, M_t$),
- (vii) a taxa de utilização de cada operação i , realizada no componente p , é expressa como a percentagem da capacidade disponível numa máquina do tipo t , necessária para realizar essa operação, e é representada por u_{ipt} .

(viii) a taxa de utilização de cada operação inclui o tempo necessário para a preparação da operação.

A heurística proposta desenvolve-se em duas fases, nomeadamente: (i) a formação das famílias de componentes e (ii) a afetação dessas famílias de componentes aos equipamentos.

5.3.1. Heurística

Nas secções seguintes são apresentados os passos e os parâmetros considerados na heurística proposta para a resolução do problema da formação de células de fabrico virtuais.

5.3.1.1. Codificação

Cada indivíduo da população corresponde a uma solução para o problema da formação das famílias de componentes e é representado por um vetor de comprimento P. Cada elemento deste vetor representa a família a que o componente correspondente é afetado. Na figura 5.1 apresenta-se, na primeira linha, um exemplo do cromossoma de um indivíduo, para um problema com dez componentes, e a correspondente descodificação do cromossoma.

Indivíduo	2	1	3	1	3	3	4	5	5	4
Família	1		2	3			4		5	
Componente	2	4	1	3	5	6	7	10	8	9

Figura 5.1 - Exemplo de um indivíduo e solução correspondente

Assim, teremos o componente 1 afetado à família 2, o componente 2 à família 1, o componente 3 à família 3 e assim sucessivamente. A codificação é facilmente traduzida numa solução para a constituição das famílias de componentes, sendo simples a transição entre a codificação e a respetiva solução.

5.3.1.2. Inicialização da população

A população e as subseqüentes gerações são compostas por P indivíduos, ou seja, o

número de indivíduos da população é igual ao número de componentes do problema. Os elementos da primeira população são gerados aleatoriamente de acordo com o procedimento apresentado na figura 5.2.

```

Inicializar população:  $G = \emptyset$ ,
i = 1,
repetir
   $G_i = \emptyset$ 
  para j = 1 até P /*a população é constituída por P indivíduos, sendo P o número total
  de componentes*/
    r = int(random[1,P]) /*representa a família para o j-ésimo componente*/
     $G_i = G_i + \{g_j(r)\}$ , /*adiciona-se um novo valor a j-ésima posição do indivíduo i*/
  fim
   $G = G + \{G_i\}$  /*adiciona-se um novo indivíduo i à população G*/
  i = i+1
até i > P

```

Figura 5.2 - Procedimento de inicialização da população

Os elementos da população são gerados escolhendo aleatoriamente a família a que cada componente pertence, sendo que, no limite é possível ter tantas famílias como componentes. De notar que, por vezes, os indivíduos gerados não representam soluções admissíveis pois algumas famílias não são incluídas na solução sendo, portanto, necessário que estes sejam rearranjados.

5.3.1.3. Heurística *greedy* para a afetação das famílias de componentes às máquinas

Cada indivíduo da população (por exemplo, P_i) representa uma solução para o problema da formação de famílias de componentes. Para se obter uma solução completa para o problema da formação de células de fabrico virtuais é ainda necessário afetar os componentes, de cada uma das famílias obtidas para esse indivíduo, às máquinas disponíveis.

A heurística para a afetação das famílias de componentes às máquinas começa por determinar a taxa de utilização (u_{it}) de cada família ($f=1, \dots, F$) para cada tipo de máquina ($t=i, \dots, T$):

$$u_{ft} = \sum_{i=1}^O \sum_{p=1}^P u_{ipt} \cdot x_{pf} \quad , \quad f = 1, \dots, F \text{ e } t = 1, \dots, T; \quad (5.1)$$

onde x_{pf} é igual a 1 se o componente p for afetado à família f e 0, caso contrário.

As famílias de componentes são seguidamente ordenadas por ordem decrescente de acordo com a taxa de utilização para cada tipo de máquina. No passo seguinte, as famílias de componentes são afetadas, de acordo com a ordem definida anteriormente, a máquinas específicas ($m=1, \dots, M_t$) de cada tipo sendo sempre escolhida a que tem menor carga afetada. De notar que é possível afetar mais do que uma família de componentes à mesma máquina individual.

Se uma determinada família não pode ser processada na totalidade numa máquina específica então é afetada parcialmente à máquina com menor carga, depois à máquina seguinte nessas condições e sempre desta forma até estar completamente afetada.

5.3.1.4. Avaliação dos valores de *fitness*

Na heurística proposta para a formação de células de fabrico virtuais, cada indivíduo da população é avaliado de acordo com um critério que inclui dois objetivos: (i) a eficiência dos tempos de preparação dos equipamentos e (ii) o equilíbrio da carga de trabalho entre máquinas do mesmo tipo.

A redução dos tempos de preparação dos equipamentos é conseguida, essencialmente, quando componentes da mesma família utilizam o mesmo conjunto de máquinas para o processamento das respetivas sequências de operações. O coeficiente de semelhança dos componentes (CSC) mede o nível de semelhança na realização da sequência de processamento entre componentes da mesma família, para as diversas famílias e é definido do seguinte modo:

$$CSC = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{q=p+1}^P s_{pq} \cdot x_{pf} \cdot x_{qf}}{\sum_{p=1}^P \sum_{q=p+1}^P x_{pf} \cdot x_{qf}} \quad (5.2)$$

Este coeficiente procura analisar a semelhança entre os componentes através de uma medida de semelhança (s_{pq}) que tem por base o número de operações comuns entre componentes e que é definida da seguinte forma:

$s_{pq}=2^*(\text{número de operações comuns entre os componentes p e q} / (\text{número de operações na sequência de fabrico do componente p} + \text{número de operações na sequência de fabrico do componente q}))$ (5.3)

O denominador do coeficiente representa o número total de pares comparados sendo que as variáveis x_{pf} são binárias e indicam se o componente p pertence à família f (neste caso a variável seria um) ou não (a variável seria zero).

A utilização isolada deste coeficiente pode conduzir a soluções com um grande número de famílias e um pequeno número de componentes em cada família. Para contrariar esta tendência foi introduzido um coeficiente de dissemelhança das famílias de componentes (CDF). A combinação do CSC e do CDF ajuda o algoritmo a convergir para uma solução com um menor número de famílias onde o grau de diferenciação entre as mesmas é, preferencialmente, muito elevado.

O coeficiente de dissemelhança das famílias de componentes é definido do seguinte modo:

$$CDF = 1 - \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{g=f+1}^F \sum_{p=1}^P \sum_{q=p+1}^P s_{pq} \cdot x_{pf} \cdot x_{qg}}{\sum_{f=1}^F \sum_{g=f+1}^F \left(\sum_{p=1}^P x_{pf} \cdot \sum_{p=1}^P x_{pg} \right)} \quad (5.4)$$

Este procura avaliar a semelhança entre os componentes que se encontram em famílias diferentes, sendo utilizado o complementar desse valor dado que se pretende que as famílias tenham um reduzido grau de semelhança.

O equilíbrio da carga de trabalho entre diferentes máquinas do mesmo tipo t é calculado pela seguinte expressão:

$$WB = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(1 - \left(\frac{M_t}{M_t - 1} \sum_{m=1}^{M_t} \left(\frac{w_m}{W_t} - \frac{1}{M_t} \right)^2 \right) \right) \quad (5.5)$$

onde M_t representa o número de máquinas do tipo t, w_m é a taxa de capacidade não utilizada na máquina m e W_t corresponde ao total de capacidade não utilizada nas máquinas do tipo t. Se, para um certo tipo de máquina t, existe apenas uma unidade então WB fica com valor unitário.

Assim, o valor de *fitness* de cada indivíduo da população é dado por:

$$F = \alpha \cdot ((CSC + CDF)/2) + (1-\alpha) \cdot (WB); \quad (5.6)$$

onde α corresponde a um parâmetro definido pelo utilizador e que lhe permite atribuir pesos diferentes aos diferentes objetivos.

Pela análise dos coeficientes é simples perceber que F é melhor para valores mais perto de 1, enquanto que valores perto de 0 corresponderão a soluções indesejáveis. Deste modo o procedimento tenta maximizar os valores da função *fitness* dos indivíduos.

5.3.1.5. Seleção por torneio

A técnica de seleção por torneio reflete mais adequadamente o comportamento natural dos indivíduos, simulando a ‘competição’ mútua durante ‘encontros’ aleatórios (Michalewicz, 1996). Esta forma de seleção da população é resumida na figura 5.3.

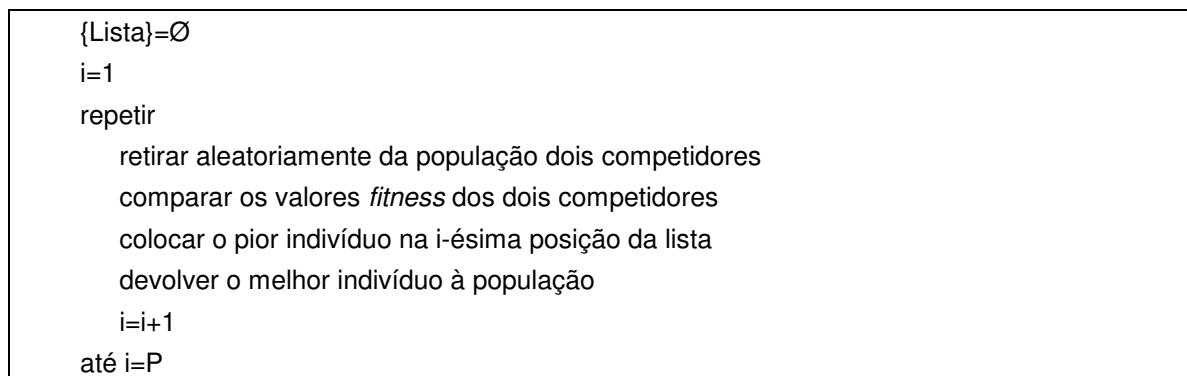


Figura 5.3 - Seleção por torneio

A lista resultante da seleção por torneio é utilizada para hierarquizar os indivíduos servindo para determinar quais serão mantidos na geração seguinte e quais serão eliminados.

5.3.1.6. Substituição da população

São mantidas duas populações num sistema denominado ‘algoritmo genético geracional’: a população corrente e a futura (Falkenaeur, 1999). Isto significa que, em cada geração, é criada uma nova população que substitui a população corrente.

Os indivíduos da população futura provêm de duas fontes: reprodução (indivíduos da população corrente são copiados para a nova geração) e recombinação ou *crossover* (indivíduos que resultam da recombinação de dois progenitores da população corrente). Após a criação da nova população é aplicado um operador de mutação a alguns dos indivíduos, antes de esta substituir a população corrente.

A taxa de reprodução utilizada é de 0,5, significa portanto que os $\lfloor P/2 \rfloor$ melhores indivíduos na população são mantidos na geração seguinte. Os restantes $\lceil P/2 \rceil$ indivíduos que faltam para completar a geração futura resultam da aplicação do operador de recombinação aos $\lceil P/2 \rceil$ melhores indivíduos da lista de seleção por torneio.

De notar que se $\lfloor P/2 \rfloor$ é igual a $\lceil P/2 \rceil$ e são ambos números ímpares então $\lceil P/2 \rceil + 1$ indivíduos são recombinados e $\lfloor P/2 \rfloor - 1$ são reproduzidos. Por outro lado se $\lfloor P/2 \rfloor$ não é igual a $\lceil P/2 \rceil$ e se $\lceil P/2 \rceil$ é um número ímpar então $\lfloor P/2 \rfloor + 1$ indivíduos são reproduzidos e $\lceil P/2 \rceil - 1$ indivíduos são recombinados.

5.3.1.7. Operadores de recombinação e mutação

O operador de recombinação é aplicado a uma série de indivíduos da população corrente, de acordo com o procedimento apresentado na figura 5.4.

```

Se  $\lfloor P/2 \rfloor = \lceil P/2 \rceil$  e ambos ímpares
   $j = \lceil P/2 \rceil + 1$ 
   $k = \lceil P/2 \rceil$ 
Se  $\lfloor P/2 \rfloor \neq \lceil P/2 \rceil$  e  $\lceil P/2 \rceil$  ímpar
   $j = \lceil P/2 \rceil - 1$ 
   $k = \lceil P/2 \rceil + 1$ 
senão  $j = \lceil P/2 \rceil$  e  $k = \lceil P/2 \rceil$ 
Para  $i=0$  até  $(j/2)-1$ 
  escolher o indivíduo na  $(k+i)$ -ésima posição da lista
  escolher o indivíduo na  $(P-i)$ -ésima posição da lista
  recombinar os dois indivíduos
  inserir os dois descendentes na população futura
fim.

```

Figura 5.4 - Recombinação dos indivíduos

Foi usado um operador de recombinação *partial match* tradicional (Hamamoto *et al.*,

1999), que a partir de dois progenitores (A e B), com dois pontos de corte escolhidos aleatoriamente entre 1 e P e assinalados por '|', permite obter dois descendentes (a e b) de acordo com o esquema apresentado na figura 5.5.

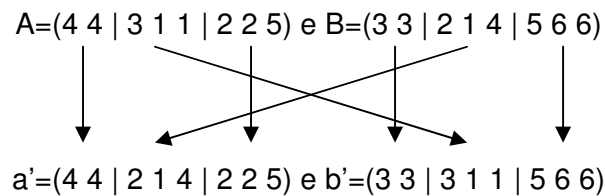


Figura 5.5 - Operador de recombinação

O descendente a' é definido com recurso ao início e ao fim da sequência do progenitor A e à parte central da sequência do progenitor B. Já o descendente b' utiliza o início e o fim da sequência do progenitor B e a parte central da sequência do progenitor A. É possível, deste modo, obter dois descendentes que cruzam informação proveniente de ambos os progenitores.

Naturalmente os descendentes não representam necessariamente soluções admissíveis pois alguns números de famílias podem não aparecer. Neste exemplo os descendentes seriam rearranjados, sendo as famílias renumeradas (por exemplo, no primeiro descendente não existia a família 3 logo, a família 4 passa a 3 e a família 5 a 4) ficando, no final, da seguinte forma:

$$a=(3 3 | 2 1 3 | 2 2 4) \quad b=(2 2 | 2 1 1 | 3 4 4)$$

Quanto ao operador de mutação, este é aplicado a $\lceil P/2 \rceil$ indivíduos pertencentes à população futura antes desta se transformar na população corrente. Os indivíduos são escolhidos aleatoriamente (excetuando-se o melhor indivíduo encontrado até ao momento) e o componente i (em que i é um número aleatório entre 1 e P) é transferido para outra família f ou leva a criação de uma nova família f (f também é escolhido aleatoriamente entre 1 e P).

5.3.1.8. Critério de paragem

O procedimento termina quando se verifica uma de duas condições: (i) o valor de *fitness* do melhor indivíduo não melhora após P iterações, ou (ii) o número total de iterações

ultrapassa o valor máximo ($P \times P$). A utilização do número de componentes (P) na definição do critério de paragem deriva da constatação que a dimensão do espaço de soluções, $(\sum_{p=1}^P p^P)$, está diretamente relacionada com esse valor.

5.3.2. Ilustração numérica

Para ilustrar a aplicação do algoritmo foi gerado um exemplo em que se consideraram cinco componentes (A, B, C, D e E) e nove operações de fabrico (1 a 9) a serem realizadas em três tipos de máquinas (X, Y, e Z). Na tabela 5.1 apresentam-se os dados de processamento dos componentes e na tabela 5.2 os dados de processamento das operações, para o exemplo considerado.

Tabela 5.1 - Dados de processamento dos componentes

Componente	Sequência de processamento e taxa de utilização (u_{ipt})
A	1(0,2), 3(0,1), 6(0,3), 8(0,3)
B	2(0,1), 4(0,3), 5(0,7), 7(0,3), 9(0,2)
C	4(0,2), 6(0,2), 3(0,4)
D	7(0,5), 8(0,4), 9(0,2), 1(0,1)
E	2(0,3), 5(0,3), 4(0,1), 7(0,6), 2(0,4)

Tabela 5.2 - Dados de processamento das operações

Operação	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tipo de máquina (t)	X	Y	Y	X	Z	Y	Z	X	Z

A partir desta informação é fácil determinar o coeficiente de semelhança entre os diferentes componentes, bastando contabilizar, da forma explicada na secção 5.3.1.4., o número de operações comuns entre eles (ver tabela 5.3).

Tabela 5.3 - Matriz de semelhanças entre componentes (s_{pq})

	A	B	C	D	E
A	--	0	0,57	0,50	0
B	--	--	0,25	0,44	0,80
C	--	--	--	0	0,25
D	--	--	--	--	0,22
E	--	--	--	--	--

A figura 5.6 mostra a população inicial, constituída por cinco indivíduos gerados de uma forma totalmente aleatória e a respetiva descodificação. Para gerar um indivíduo afetam-se os componentes a uma família escolhida aleatoriamente (inicialmente poderão existir tantas famílias, 1 a 5, como componentes). A descodificação traduz essa afetação permitindo identificar a constituição de cada família. Por exemplo, no quarto indivíduo foram criadas quatro famílias de componentes: família 2 constituída pelos componentes A e B, família 3 constituída pelo componente E, família 4 constituída pelo componente C e família 5 constituída pelo componente D, sendo, sempre que necessário, as famílias reenumeradas.

1	2	3	1	4	Componente	A	B	C	D	E
					Família	1	2	3	1	4
2	3	5	5	1	Componente	A	B	C	D	E
					Família	2	3	5	5	1
1	3	4	5	2	Componente	A	B	C	D	E
					Família	1	3	4	5	2
2	2	4	5	3	Componente	A	B	C	D	E
					Família	2	2	4	5	3
5	4	3	2	1	Componente	A	B	C	D	E
					Família	5	4	3	2	1

Figura 5.6 - População inicial (dimensão P=5) e descodificação

Seguidamente é analisado o primeiro indivíduo com maior detalhe, de forma a explicitar melhor a aplicação da heurística *greedy* e a avaliação do valor de *fitness* de uma solução, pontos mais específicos da aplicação dos algoritmos genéticos ao problema da formação das células de fabrico.

Neste indivíduo temos quatro famílias de componentes: a família 1 inclui os componentes A e D, a família 2 inclui o componente B, a família 3 o componente C e a família 4 o componente E.

Na tabela 5.4 é apresentada a taxa de utilização de cada tipo de máquina (colunas X, Y e Z), para cada família, a ordem pela qual cada família é afetada a máquinas (coluna Ordem) de um certo tipo e a máquina específica a que é atribuída (coluna N^o máquina). Na tabela 5.5 é apresentada a taxa total de utilização dos equipamentos por família de

máquina.

Tabela 5.4 - Taxa de utilização dos equipamentos por família

Família	Tipo de máquina								
	X	Ordem	Nº máquina	Y	Ordem	Nº máquina	Z	Ordem	Nº máquina
1	1,0	1	1	0,4	3	2	0,7	3	2
2	0,3	2	2	0,1	4	1	1,2	1	1; 2
3	0,2	3	2	0,6	2	2	0	--	
4	0,1	4	2	0,7	1	1	0,9	2	3

Tabela 5.5 - Taxa total de utilização dos equipamentos por família

Tipo de máquina	X	Y	Z
Total de utilização	1,6	1,8	2,8
Total de máquinas	2	2	3

Aplicando a expressão 5.2 e seguintes consegue-se avaliar a qualidade dessa solução (indivíduo 1). Assume-se que α tem um valor de 0,5 e excluem-se do cálculo do CSC as famílias com apenas um componente pois não podemos calcular a semelhança deste consigo mesmo. Neste caso o valor de *fitness* é de: $F = 0,5 * ((0,5+0,27)/2) + 0,5 * 0,25 = 0,3175$, o que não pode ser considerado muito favorável uma vez que os melhores valores são os mais próximos de um.

5.3.3. Melhoramento do coeficiente de semelhança

Na secção anterior foi apresentado um procedimento que, ao avaliar a qualidade de cada solução, utilizava uma medida da semelhança entre os componentes de cada família considerando apenas o número de operações comuns entre estes. Contudo, esse coeficiente (s_{pq}) não considerava também a semelhança entre as sequências de processamento.

Dado que a definição das famílias de componentes é um dos problemas centrais no planeamento de um sistema de produção celular virtual a avaliação adequada da semelhança entre componentes é essencial.

Quando se pretende formar famílias de componentes uma das técnicas mais utilizadas é o recurso a coeficientes (de semelhança ou dissemelhança) que permitem avaliar a

qualidade das famílias formadas.

Como foi referido no capítulo 3 existem inúmeros coeficientes para a formação de famílias de componentes sendo que estão contudo, maioritariamente, vocacionados para SPC tradicionais.

Foi então desenvolvido um coeficiente para medir a semelhança entre componentes que considera, não só as operações comuns, mas também a ordem em que estas são realizadas. Esse coeficiente foi então integrado na função *fitness* do procedimento apresentado anteriormente.

A definição do coeficiente de semelhança para cada par de componentes dará origem a uma matriz de semelhanças que deverá servir como dado de entrada para a resolução do problema da formação das células virtuais.

Para construir essa matriz considerou-se que: (i) a sequência de processamento de cada componente é conhecida, (ii) a mesma operação pode ser realizada em componentes diferentes e (iii) o tempo de preparação de uma operação é constante e não depende do componente onde esta vai ser realizada.

A comparação entre dois componentes é feita considerando que a rota de processamento de uma família é determinada pela sequência de processamento mais longa (ou seja, a que engloba um maior número de operações).

Considerando dois componentes distintos x e y , em que o comprimento de y , i.e. o número de operações na sua sequência de processamento, é maior que o comprimento x o coeficiente de semelhança (c_{xy}) entre os dois componentes pode ser determinado da seguinte forma:

$$c_{xy} = \alpha \cdot \left(\frac{u}{m+n-u} \right) + \beta \cdot \left(1 - \frac{v+w}{m} \right) + \gamma \cdot \left(1 - \frac{z}{n} \right) \quad (5.7)$$

em que :

- m é o comprimento do componente x ;
- n é o comprimento do componente y , portanto $m \leq n$;
- u é o número de operações partilhadas pelos dois componentes;
- v é o número de operações realizadas no componente x que são diferentes

das realizadas no componente y ;

- w é o número de pares de operações que no componente x têm uma ordem inversa à que apresentam na sequência de processamento do componente y ;
- z é o número de operações realizadas no componente y que são diferentes das realizadas no componente x ;
- α , β e γ são parâmetros definidos pelo utilizador que permitem atribuir pesos diferentes a cada termo do coeficiente de semelhança ($\alpha + \beta + \gamma = 1$).

O primeiro termo da equação 5.7 determina a proporção de operações partilhadas pelos dois componentes.

O segundo termo da equação 5.7 calcula o complemento da proporção de operações diferentes ou desordenadas na sequência de menor dimensão, o que avalia o número de viagens extra originadas pelo agrupamento dos componentes x e y . Se um determinado par de componentes tiver um grande número de operações diferentes ou desordenadas é natural que não fiquem agrupados na mesma família.

Finalmente o terceiro termo da equação 5.7 considera as operações que o componente x não realizará, por comparação ao componente y . Esta situação pode levar a atrasos no processamento do componente x se este for forçado a esperar pelo componente y . Adicionalmente irá complicar o fluxo entre as máquinas e departamentos uma vez que componentes de uma determinada família não utilizam todas as máquinas afetadas à mesma o que também poderá levar à subutilização desses equipamentos.

Os três parâmetros definidos pelo utilizador (α , β e γ) permitem-lhe atribuir pesos diferentes aos diferentes termos incluídos no coeficiente de semelhança, por exemplo o número de viagens extra versus o tempo de espera de um componente que não utiliza todas as máquinas afetadas à respetiva família.

Se o comprimento das sequências de processamento de todos os componentes do sistema for semelhante será normal atribuir um valor nulo ou quase nulo a γ , dado que os dois termos restantes seriam suficientes para avaliar a semelhança entre dois componentes com comprimentos similares.

Se o decisor optar por atribuir o mesmo valor aos parâmetros, estará implicitamente a dar uma maior importância ao segundo elemento do coeficiente em relação ao terceiro,

dado que este é calculado em função de m e o terceiro em função de n (de lembrar que $m \leq n$). Considera-se que, uma vez que em sistemas de produção celulares virtuais os equipamentos estarão, na maior parte das vezes, em departamentos distantes entre si, a necessidade de realizar viagens extra deverá ser penalizada.

Esta possibilidade do utilizador poder alterar os parâmetros também é útil para o caso de se pretender utilizar o coeficiente no projeto de sistemas de produção celulares tradicionais. Nesse tipo de sistema não utilizar um equipamento ou necessitar de um equipamento extra deverá ter um impacto semelhante no desempenho do sistema, desde que todas as máquinas necessárias estejam localizadas na mesma célula. Nesta situação os parâmetros definidos pelo utilizador poderiam assumir valores semelhantes.

Independentemente dos valores dos parâmetros o coeficiente varia entre 0 (componentes pouco semelhantes) e 1 (componentes muito semelhantes).

Este novo coeficiente foi desenvolvido para ultrapassar algumas das limitações do coeficiente de semelhança (s_{pq}) utilizado na função de *fitness* do procedimento apresentado anteriormente.

O valor de *fitness* de cada indivíduo continua a ser avaliado tendo em conta o duplo objetivo do procedimento: (i) a eficiência, ao nível dos tempos de preparação, obtida a partir da formação adequada das famílias de componentes, e (ii) o balanceamento da carga de trabalho conseguida pelo outro coeficiente (apresentado anteriormente) incorporado na função de *fitness*.

A função de *fitness* considerada é a mesma apresentada no início do capítulo (expressão 5.5). De notar que nas expressões 5.2 e 5.4, que representam termos da função *fitness*, o valor do coeficiente s_{pq} é agora substituído pelo novo coeficiente de semelhança entre componentes (c_{pq}).

Como já foi explicado, os coeficientes (expressões 5.2, 5.4 e 5.5) que constituem a função objetivo do modelo originam melhores valores quando estão perto de 1 enquanto que valores perto de 0 correspondem a soluções indesejáveis. Deste modo, o procedimento tentará encontrar o indivíduo com maior valor de *fitness*.

5.3.3.1. Ilustração numérica do coeficiente de semelhança

Para ilustrar, de forma mais clara, o cálculo do novo coeficiente de semelhança, foi

gerado o exemplo apresentado na tabela 5.6, que considera as sequências de processamento de três componentes:

Tabela 5.6 - Sequências de processamento dos componentes a, b e c

Componentes	Operações							
a	1	3	7	8				
b		3	4	9	7	5		
c			1	3	5	6	7	8 9

Na tabela 5.7 são apresentados os dados necessários para determinar os coeficientes de semelhança entre todos os possíveis pares de componentes, nomeadamente a indicação dos componentes a comparar (nas linhas componente x e componente y) e os diferentes elementos do coeficiente de semelhança (m, n, u, v, w, z), explicados anteriormente:

Tabela 5.7 - Parâmetros do coeficiente

Componente x	a	a	b
Componente y	b	c	c
m	4	4	5
n	5	7	7
u	2	4	4
v	2	0	1
w	0	0	2
z	3	3	3

Por defeito, os valores dos parâmetros α , β e γ são iguais o que significa que todos os termos de c_{xy} têm igual peso. A determinação dos coeficientes (c_{xy}) fica então reduzida à simples aplicação da expressão 5.6 a cada par de componentes, apresentando-se na tabela 5.8 a matriz dos coeficientes de semelhança obtidos pela aplicação da expressão 5.7 a este exemplo.

Tabela 5.8 - Matriz dos coeficientes de semelhança

	a	b	c
a	-	0,395	0,714
b	0,395	-	0,490
c	0,714	0,490	-

Com base nestes resultados, verifica-se que a e c são componentes muito similares (com um coeficiente de semelhança de 71,4%), de acordo com os critérios do coeficiente, ao contrário, por exemplo, de a e b ou b e c (com coeficientes de semelhança de 39,5% e 49%, respetivamente). Por observação da informação contida na tabela 5.6, nomeadamente a análise das sequências de processamento dos componentes, é possível verificar que os valores obtidos para os coeficientes traduzem a semelhança entre essas sequências.

5.3.4. Experiência computacional

Para testar o comportamento do algoritmo foram gerados aleatoriamente seis problemas de dimensões diferentes. Para cada um desses problemas realizaram-se 10 experiências, sendo apresentado o resumo dos resultados obtidos na tabela 5.9. É dada uma indicação da dimensão dos problemas através do número de tipos de máquinas e do número de operações, é apresentada a informação em relação ao valor da função objetivo e, na última coluna, o valor médio de melhoramento na função objetivo, quando se compara a solução inicial com a solução final do procedimento.

Tabela 5.9 - Resultados da experiência computacional

Dimensão do problema		Função objetivo				Valor médio de melhoramento da função objetivo (%)
Nº de tipos de máquinas	Nº de operações	Valor médio	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	
8	20	0,315	0,004	0,309	0,321	26%
12	35	0,303	0,003	0,299	0,310	13%
15	45	0,285	0,005	0,279	0,296	13%
20	55	0,272	0,003	0,272	0,003	10%
30	70	0,261	0,001	0,258	0,263	6%
35	90	0,258	0,262	0,260	0,001	5%

Os resultados obtidos foram positivos em termos de desempenho, tendo-se verificado que o procedimento consegue melhorar substancialmente o valor da função objetivo em relação à solução inicial. Na figura 5.7 apresenta-se evolução do valor da função objetivo e dos respetivos termos, para uma das experiências realizadas, sendo possível visualizar a convergência do procedimento para uma solução estável.

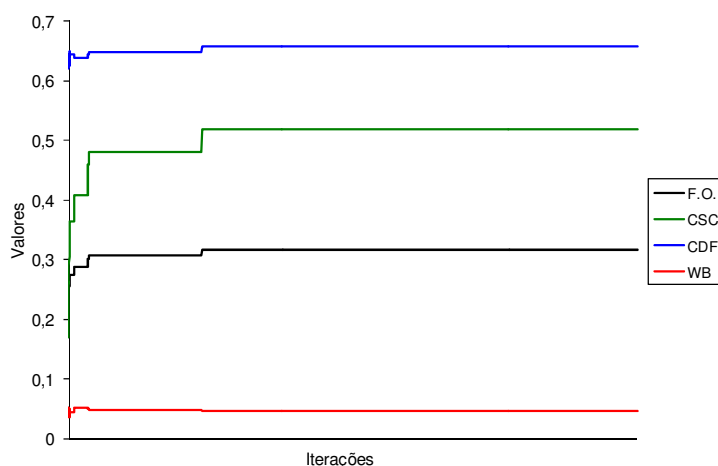


Figura 5.7 – Gráfico de convergência do procedimento

Adicionalmente os tempos de computação foram bastante bons, não tendo ultrapassado, para o problema de maior dimensão, os 5,6 minutos. Na prática, dado o bom desempenho em termos de esforço computacional, os parâmetros do procedimento não foram ajustados para cada problema tendo-se utilizado, para todos eles, como critério de paragem, o número máximo de 50.000 iterações ou de 5.000 sem que a melhor solução encontrada seja alterada.

Seria interessante o teste do procedimento com dados de uma situação real por forma a verificar o impacto que a solução gerada poderia ter, se implementada, no desempenho do sistema.

5.4. Algoritmo genético para o problema da formação de células de fabrico virtuais numa implantação distribuída

Um SPCV apresenta um elevado grau de flexibilidade, útil em ambientes de grande volatilidade em que o perfil da procura muda frequentemente. Existem, porém, formas alternativas de implementar estas células virtuais tal como, por exemplo, a sugerida por Benjaafar *et al.* (2002): usar uma implantação distribuída como base para a definição das células.

Numa implantação distribuída os departamentos funcionais são fragmentados sendo os equipamentos estrategicamente espalhados na área fabril (Lahmar e Benjaafar, 2005), podendo estes ser afetados temporariamente a células virtuais. Se o padrão de procura se altera a constituição das células é também modificada. A figura 5.8 mostra uma implantação distribuída, sobre a qual foram criadas duas células virtuais dedicadas ao processamento de duas famílias de componentes com características diferentes.

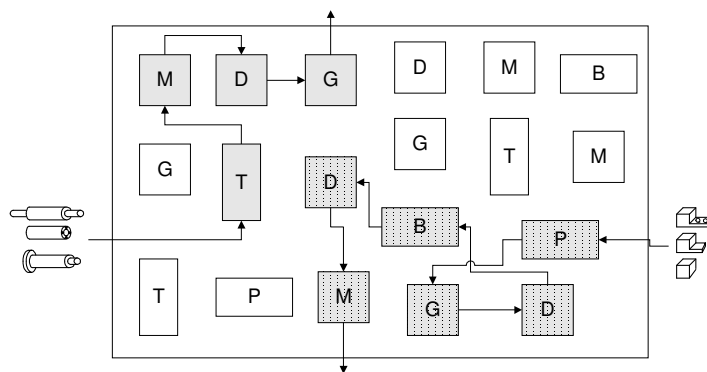


Figura 5.8 – Sistema de produção celular virtual numa implantação distribuída

Lahmar e Benjaafar (2005) afirmam que quando as células virtuais são formadas com base num sistema organizado por processo o seu desempenho não corresponde ao esperado. Para colmatar este problema, estes autores apresentam um procedimento de arrefecimento simulado que utiliza as capacidades dos equipamentos para desenhar implantações distribuídas. Apresentam ainda um exemplo para ilustrar a superioridade destas implantações como base para a formação de células virtuais.

Tendo em conta a argumentação apresentada por aqueles autores foi considerado

relevante estudar o problema da formação de células de fabrico virtuais numa implantação distribuída, tendo sido desenvolvido um algoritmo para a sua resolução.

Neste ponto é apresentado esse algoritmo que inclui duas fases: (i) a resolução do problema da formação das famílias de componentes e (ii) a definição da constituição das células virtuais. O algoritmo utiliza uma metaheurística como forma de melhorar a exploração do espaço de soluções.

Ao ser utilizada uma implantação distribuída, o problema da definição dos grupos de equipamentos adquire outra complexidade e inclui, para além da afetação das famílias às máquinas e o balanceamento da carga de trabalho entre máquinas do mesmo tipo, a questão da distância percorrida pelos componentes e a complexidade do fluxo entre máquinas afetadas à mesma célula.

O algoritmo proposto é apresentado nas secções seguintes e tem por base o mesmo tipo de algoritmos genéticos já utilizados anteriormente. Este algoritmo tem por objetivo o de resolver o problema da formação das células de fabrico virtuais numa implantação distribuída considerando os seguintes objetivos: (i) a redução dos tempos de preparação ao agrupar na mesma família componentes com requisitos de processamento semelhantes, (ii) o balanceamento da carga de trabalho entre equipamentos do mesmo tipo, (iii) a redução da distância percorrida pelos componentes e (iv) a simplificação do fluxo entre máquinas.

O procedimento apresentado no início do capítulo já considerava a formação das famílias de componentes por forma a reduzir os tempos de preparação e a sua afetação a máquinas de maneira a distribuir equitativamente a carga de trabalho entre máquinas do mesmo tipo. Um aspeto relevante é que esse procedimento permitia que diferentes famílias pudessem ser alocadas à mesma máquina, sujeitas, naturalmente, à capacidade disponível. Adicionalmente este havia sido melhorado pela inclusão, na função objetivo, de um novo coeficiente que avalia a semelhança, em termos de sequência de fabrico, entre os componentes das diversas famílias.

Para a adaptação do algoritmo a este novo problema, e tendo em conta complexidade do problema e a quantidade de informação requerida para a sua resolução, foi necessário assumir alguns pressupostos, nomeadamente que:

- O nível de produção é estável para o horizonte temporal considerado.

- A globalidade da produção pode ser adequadamente representada por um conjunto limitado de componentes a serem fabricados em quantidades predeterminadas, para o horizonte temporal definido.
- A sequência de processamento de cada componente é conhecida.
- Cada operação de fabrico ($i=1,\dots,O$) pode ser realizada em componentes diferentes ($p=1,\dots,P$) sendo, contudo, a preparação a mesma.
- A produção será realizada num conjunto de equipamentos classificados de acordo com o seu tipo ($t=1,\dots,T$).
- Cada operação pode ser realizada num conjunto de equipamentos do mesmo tipo, ou seja funcionalmente idênticos ($m=1,\dots,M_t$).
- A taxa de ocupação de uma operação i , quando realizada num componente p , é definida como uma percentagem da capacidade disponível em cada máquina do tipo t , e é denotada por u_{ipt} .
- A taxa de ocupação de uma operação inclui o tempo de preparação requerido para essa operação.
- A implantação distribuída está pré-definida e a localização de cada máquina é conhecida.
- As coordenadas do centro geométrico de cada máquina são definidas de acordo com um referencial comum e designam-se por x_k e y_k .
- Um componente origina fluxo quando é transportado entre duas máquinas (k e g) e esse fluxo corresponde à respetiva procura durante o horizonte de planeamento (D_p).
- Todas as máquinas são classificadas entre 1 e K , independentemente do respetivo tipo.

Nos pontos seguintes será descrito o novo procedimento sendo, naturalmente, dada maior ênfase aos aspetos que o diferenciam do algoritmo explicado anteriormente.

A heurística proposta anteriormente incluía duas fases: (i) formação das famílias de componentes ($f=1,\dots,F$) e (ii) afetação das famílias aos equipamentos através de uma heurística *greedy*.

O algoritmo considerava diversos aspetos relevantes na formação de células virtuais mas assumindo que estas seriam formadas tendo por base uma implantação organizada por processo. Quando se muda para uma implantação distribuída surgem outros aspetos a considerar. Mais especificamente, no novo algoritmo existem dois pontos essenciais que foram alterados devido a dois novos aspetos, nomeadamente: (i) a heurística *greedy* foi modificada passando a incluir um procedimento de pesquisa local que procura ajudar a melhorar cada indivíduo e (ii) a função objetivo (ou de *fitness*) inclui duas novas parcelas de maneira a considerar a distância viajada por cada componente e a complexidade do fluxo.

Como foi dito anteriormente, o algoritmo tem por base algoritmos genéticos, uma metaheurística conhecida que consiste em procedimentos de pesquisa iterativos que se baseiam no processo biológico de seleção natural e na genética. É gerado um conjunto de indivíduos que vão sofrendo transformações ao longo de várias gerações sendo que, a ideia é que as ‘melhores’ características sejam mantidas e os indivíduos sejam aperfeiçoados até que se atinja uma solução ótima ou perto de ótima.

A figura 5.9 mostra, de forma resumida, o funcionamento do procedimento. Os passos assinalados com sombreado indicam os pontos que foram alterados, em relação ao procedimento apresentado na seção 5.3.1., por forma a considerar a situação em que é usada uma configuração distribuída da implantação.

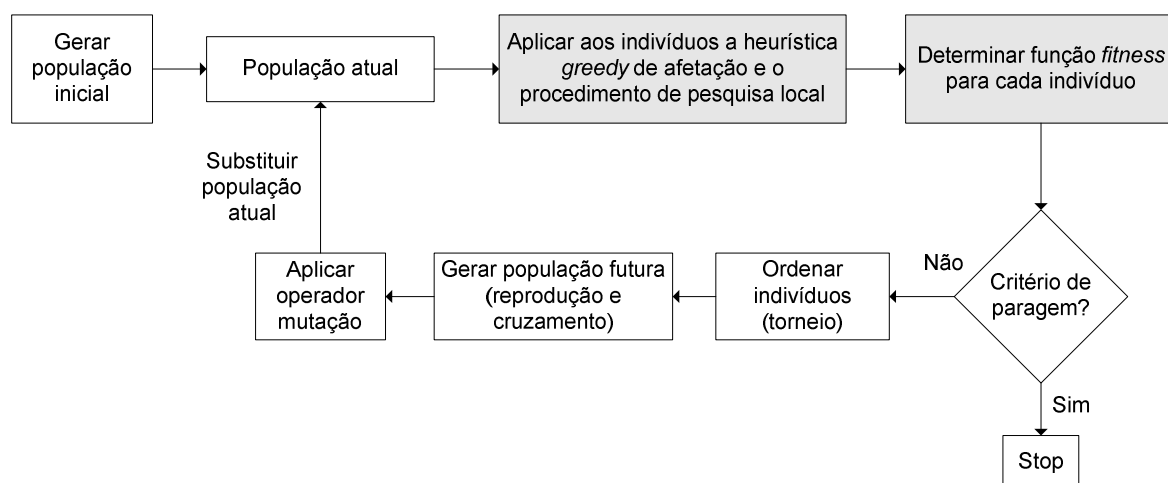


Figura 5.9 - Procedimento do algoritmo genético

Os primeiros passos do algoritmo incluem a codificação dos indivíduos e a geração da população inicial como forma de inicializar o procedimento.

Quanto à codificação foi mantida a mesma estrutura sendo que cada indivíduo é representado por um vetor de dimensão P (número de componentes), em que cada elemento representa um componente e o valor respetivo representa a família desse componente, tal como explicado no ponto 5.3.1.1.

A população inicial, composta por P indivíduos, é gerada aleatoriamente através do mesmo procedimento já apresentado (ver ponto 5.3.1.2.).

Para cada indivíduo é possível obter uma solução para o problema de formação das famílias de componentes contudo é ainda necessário afetar essas famílias às máquinas disponíveis.

A heurística de afectação *greedy* começa por determinar a taxa de utilização para cada família em cada um dos diferentes tipos de máquinas. As famílias são então ordenadas, em ordem decrescente da taxa de utilização, para cada tipo de máquina. São, de seguida, afetadas, por essa ordem, a máquinas específicas de cada tipo ($m=1, \dots, M_t$) começando-se pelas que têm menos carga de trabalho.

Mais uma vez é de realçar que podem ser processadas numa máquina específica mais do que uma família de componentes. Assim, se uma família não encaixa totalmente numa máquina então é parcialmente afetada à máquina com menos carga de trabalho, de seguida à máquina nas mesmas condições e continua até que a família seja totalmente alocada.

Ao aplicar esta heurística a cada indivíduo encontra-se uma solução para o problema da formação de células virtuais contudo, e com o intuito de melhorar cada solução, um procedimento aleatório de pesquisa local é de seguida aplicado a cada solução. Cada família de componentes utiliza diversas máquinas e assim, para cada família uma dessas máquinas é escolhida aleatoriamente e a família de componentes é então transferida dessa máquina para outra do mesmo tipo, também escolhida aleatoriamente, de entre as que apresentam capacidade suficiente para processar a totalidade dos componentes dessa família. Este procedimento pode eventualmente melhorar a solução, uma vez que equilibra melhor a carga de trabalho entre máquinas do mesmo tipo, por reduzir a

distância percorrida pelos componentes ou mesmo por conduzir a uma simplificação do fluxo.

Cada indivíduo e cada solução construída, com base nesse indivíduo, pelo procedimento aleatório tem que ser avaliada de acordo com a função de *fitness* definida.

Esta função envolve diferentes objetivos: (i) a eficiência em termos de tempos de preparação, (ii) o balanceamento da carga de trabalho, (iii) a redução dos custos de transporte e (iv) a simplificação do fluxo.

O valor de *fitness* é então determinado por:

$$F = a * ((\text{coeficiente de semelhança dos componentes} + \text{coeficiente de dissemelhança das famílias}) / 2) + b * (\text{coeficiente de balanceamento da carga}) + c * (\text{coeficiente da distância}) + d * (\text{coeficiente do fluxo}) \quad (5.8)$$

Os parâmetros a, b, c e d são definidos pelo decisor permitindo que este possa, deste modo, atribuir pesos diferentes a objetivos diferentes. A soma destes parâmetros deve dar um, por forma a que os pesos de cada coeficiente possam ser vistos como uma percentagem. É também importante realçar que cada coeficiente varia entre 0 e 1 o que simplifica a atribuição de pesos diferentes.

O coeficiente de semelhança dos componentes, já explicado anteriormente no ponto 5.3.1.4., mede o nível de semelhança entre componentes da mesma família considerando as operações comuns entre estes e as respetivas sequências de processamento.

É necessário incluir também um coeficiente de dissemelhança das famílias por forma a evitar soluções com um número elevado de famílias constituídas por um número reduzido de componentes muito semelhantes entre si. Assim, este segundo coeficiente ajuda o algoritmo a convergir para soluções com menos famílias em que o grau de dissemelhança entre as famílias é, expetavelmente, grande.

Quanto ao segundo termo da função mede, como foi explicado anteriormente no ponto 5.3.1.4., o balanceamento da carga de trabalho entre as diferentes máquinas do mesmo tipo t.

Quanto ao terceiro termo (coeficiente de distância – DC), identifica a distância que cada componente percorre e tenta minimizar o somatório desses valores, sendo calculado da seguinte forma:

$$DC = 1 - \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^K z_{pkg} \cdot D_p \cdot d_{kg}}{\sum_{p=1}^P D_p \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^K d_{kg}} \quad (5.9)$$

Em que $d_{kg} = |x_k - x_g| + |y_k - y_g|$ representa a distância retilinear entre os centros geométricos das máquinas k e g , e z_{pkg} assume o valor um se o componente p utiliza a máquina k e a máquina g e se a máquina k precede imediatamente a máquina g na sequência de processamento do componente p (caso contrário o valor de z_{pkg} é zero).

Por último o coeficiente do fluxo (FC) é uma medida da complexidade encontrada no movimento dos componentes entre máquinas. A análise é efetuada em ambos os eixos (xx e yy), se um componente muda de direção num destes eixos a função objetivo é penalizada. Deste modo as soluções em que os componentes se movimentam de uma forma mais linear são valorizadas.

O coeficiente pode ser medido da seguinte forma:

$$FC = \frac{\sum_{p=1}^P GM_{px} + \sum_{p=1}^P GM_{py}}{2 \cdot \sum_{p=1}^P TM_p} \quad (5.10)$$

TM é o número total de movimentos realizados por um determinado componente sendo, tipicamente, o número de operações de fabrico menos uma, exceto se mais que uma operação sequencial for efetuada no mesmo equipamento.

Todos os movimentos são divididos em bons movimentos (GM) e maus movimentos (BM), tanto no eixo dos xx como no eixo dos yy . O primeiro movimento não é classificado, o segundo é classificado como bom se ocorrer na mesma direção que o primeiro (num dos eixos) e mau, caso contrário. O terceiro movimento é comparado com o segundo, o quarto é comparado com o terceiro e sempre assim para todos os

movimentos realizados por um componente, sendo esta comparação realizada para ambos os eixos. No final são contabilizados os movimentos bons face ao total de movimentos realizados pelo componente.

Pela análise dos coeficientes é possível perceber que os melhores valores serão os mais próximos de um, enquanto que valores mais perto do zero representam soluções indesejáveis. Deste modo, o procedimento procura maximizar o valor de *fitness* dos indivíduos.

Os restantes aspetos do algoritmo genético, que serão novamente descritos de forma resumida nos próximos parágrafos, foram mantidos, nomeadamente: a técnica de seleção dos indivíduos, o método de substituição da população corrente, os operadores de recombinação e de mutação e o critério de paragem.

Foi utilizada a técnica de torneio para selecionar os indivíduos pois reflete mais adequadamente o comportamento natural ao simular uma ‘competição’ entre dois indivíduos que ocorre devido a ‘encontros’ aleatórios (Michalewicz, 1996).

O algoritmo genético é do tipo geracional, sendo mantidas duas populações: a corrente e a futura (Falkenaeur, 1999) o que significa que, em cada geração, uma nova população é desenvolvida para depois substituir a população corrente.

Os indivíduos da população futura são desenvolvidos com base em duas origens: reprodução (indivíduos da população corrente são copiados para a população futura) e recombinação ou *crossover* (indivíduos que resultam da recombinação de dois pais provenientes da população corrente. Depois da nova população ter sido criada e antes de substituir a população corrente, é-lhe aplicado um operador de mutação.

A taxa de reprodução utilizada foi de 0,5, o que significa que 50% dos melhores indivíduos de uma população são mantidos na geração seguinte. Os restantes indivíduos resultam da aplicação do operador de *crossover*.

Foi escolhido um operador tradicional (*partial match*) em que dois pais dão origem a dois filhos e são substituídos por estes (Hamamoto *et al.*, 1999).

Quanto ao operador de mutação, é aplicado a 50% dos indivíduos da população futura,

antes de esta substituir a população corrente. Os indivíduos são escolhidos aleatoriamente e o componente i (em que i é um inteiro aleatório entre 1 e P) é mudado para outra família f ou origina uma nova família dado que f também é gerado aleatoriamente entre 1 e P .

Finalmente, o algoritmo genético pára quando se atinge uma das condições seguintes: (i) o valor de *fitness* do melhor indivíduo não melhora após P iterações ou (ii) o número total de iterações excede o valor máximo ($P \times P$). A utilização do número de componentes (P) como forma de definir o critério de paragem deriva do facto do tamanho do espaço de soluções estar diretamente relacionado com este valor.

5.4.1. Experiência computacional

Também para este algoritmo, e dada a inexistência de instâncias para teste que contenham toda a informação requerida, optou-se por gerar aleatoriamente problemas de dimensões diferentes. Os resultados das experiências realizadas (10 para cada problema) são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 5.10 - Resultados da experiência computacional

Dimensão do problema		Função objetivo				Valor médio de melhoramento da função objetivo (%)
Nº de máquinas	Nº de operações	Valor médio	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	
10	15	0,676	0,007	0,667	0,689	11%
20	30	0,709	0,003	0,704	0,713	5%
25	40	0,704	0,005	0,698	0,713	3%
30	45	0,711	0,002	0,709	0,716	2%
40	45	0,694	0,003	0,691	0,698	3%
50	70	0,724	0,002	0,721	0,728	2%

Os valores médios de melhoramento do valor da função objetivo não são muito elevados, em princípio devido à introdução do procedimento de pesquisa local que é aplicado a todos os indivíduos gerados. Este procedimento permite, logo de início, explorar da melhor forma o espaço das soluções o que condiciona o nível de melhoramento que se consegue obter em relação à melhor solução inicial. Também a maior complexidade da função de *fitness* pode condicionar a evolução do algoritmo uma vez que quando alguns

dos termos da função melhoram outros podem piorar.

A figura 5.10 mostra a evolução do valor da função objetivo, e dos respetivos cinco termos que a constituem, para uma das experiências realizadas com os dados do primeiro problema. Nesse gráfico pode-se observar que a evolução dos cinco termos não é paralela, ocorrendo o que foi referido anteriormente (em certas situações uns termos melhoram e outros pioram) até se atingir um ponto estável que corresponde ao valor da função objetivo da solução final.

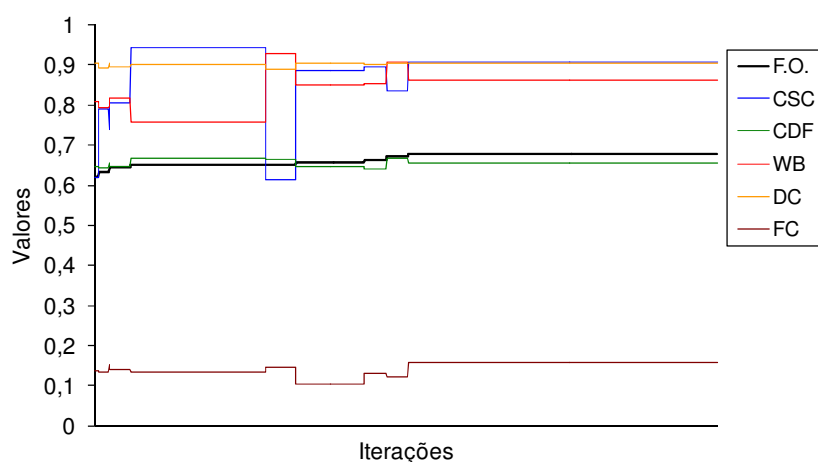


Figura 5.10 – Gráfico de convergência do procedimento

Dada a maior quantidade de informação, por comparação com o algoritmo anterior, o esforço computacional foi superior tendo surgido a necessidade de ajustar os parâmetros (nomeadamente as condições de paragem) por forma a que os tempos computacionais fossem aceitáveis.

Mais uma vez, na prática, e por uma questão de simplificação, não foram utilizadas as condições de paragem preconizadas anteriormente mas sim condições gerais que se aplicaram a todos os problemas: número máximo de 5.000 iterações ou 500 iterações em que a melhor solução encontrada não se altera. Nestas condições os tempos de computação foram admissíveis, não tendo ultrapassado, para o problema de menor dimensão, os 2,6 segundos e para o de maior dimensão os 12,9 minutos.

Dado que o conceito de implantação distribuída é relativamente recente não se conhecem realidades industriais em que esta forma de organização se encontre

implementada. Essa situação limita, obviamente, a possível aplicação, neste momento, do procedimento a uma situação real mas também dificultou a definição dos dados aleatórios uma vez que não foi possível ter uma base real de suporte ao seu desenvolvimento.

5.5. Conclusões

O problema da definição de sistemas de produção celulares virtuais só mais recentemente começou a atrair um nível significativo de atenção, quer de investigadores quer do meio industrial, contudo o interesse tem vindo a revelar-se bastante positivo, mostrando as potencialidades deste tipo de organização de sistemas de produção.

O algoritmo que se desenvolveu para esse problema (tendo por base uma implantação por processo) pretende dar um contributo para o avanço da investigação nesta área, ajudando a diferenciar o problema da formação de células de fabrico virtuais da situação tradicional, uma vez que se baseiam em condições distintas. O procedimento proposto entra em linha de conta com diversos fatores importantes, nomeadamente: (i) redução de tempos de preparação, (ii) balanceamento das cargas de trabalho e (iii) a utilização dos equipamentos por mais que uma família de componentes.

Adicionalmente um novo coeficiente foi apresentado para melhorar o trabalho desenvolvido inicialmente, pois considera a sequência de processamento dos diferentes componentes (e não apenas o número de operações comuns) para além de permitir ao decisor alguma flexibilidade no que toca aos pesos que pretende atribuir às diversas diferenças que podem ocorrer entre duas sequências de processamento.

Numa segunda fase do trabalho estudou-se uma variante do problema: a formação de células virtuais tendo por base uma implantação distribuída. A combinação destes dois conceitos relativamente recentes, células virtuais e implantações distribuídas, é uma ideia diferente e, possa embora o algoritmo ser melhorado, constitui uma primeira abordagem válida à questão.

Pretende-se chamar a atenção de investigadores e empresas para esta nova forma de organização de um sistema produtivo, contribuir para o avanço da investigação nesta área ajudando a diferenciar este problema (formação de células virtuais numa implantação distribuída) dos problemas de formação de células tradicionais ou de células virtuais em implantações organizadas por processo.

Como foi dito anteriormente, estes dois procedimentos constituem uma primeira abordagem aos problemas podendo, naturalmente, ser aperfeiçoados por forma a incluir outros aspetos. O trabalho futuro inclui: (i) testar o primeiro algoritmo já com a versão

melhorada da heurística *greedy*, que inclui o procedimento de pesquisa local e comparar os resultados, (ii) medir o fluxo, no segundo algoritmo, em termos de número de viagens realizadas e não em função do número de peças transportadas, (iii) utilizar, no segundo algoritmo, as coordenadas de pontos de carga e pontos de descarga, ao invés do centro geométrico, para definir as distâncias entre máquinas, (iv) melhorar o coeficiente de fluxo, também do segundo algoritmo, por forma a avaliar mais adequadamente a complexidade do fluxo existente, (v) refinar os parâmetros do algoritmo genético, para ambos os procedimentos, e (vi) testar os dois procedimentos com mais dados preferencialmente de problemas reais.

Segundo Baykasoglu *et al.* (1998), as duas questões principais presentes na fase de planeamento das células virtuais são: (i) 'quando criar ou reconfigurar as células?' e (ii) 'como fazê-lo?'. Neste trabalho procurou-se responder à segunda questão sendo que a resposta à outra pergunta é também de extremo interesse devendo constituir uma nova linha de estudo futuro.

6

Desenvolvimento de um Algoritmo para o Projeto de Implantações Fabris em Sistemas de Produção Celulares

Conteúdo

- Introdução
- Algoritmos genéticos para o problema das implantações fabris em sistemas de produção celulares
- Conclusões

6.1. Introdução

O problema do projeto de uma implantação fabril tem por objetivo a definição da localização relativa dos recursos na área fabril disponível.

Como foi discutido no capítulo 3 existem várias abordagens possíveis a este problema, de acordo com o tipo de recurso a implantar: (i) recursos com áreas iguais, (ii) recursos com áreas diferentes e (iii) recursos com configuração geométrica fixa.

No caso dos sistemas de produção celulares (SPC) a definição da implantação enquadra-se na última destas categorias de problemas dado que os objetos a implantar devem ser tratados admitindo-se que a sua configuração geométrica é fixa.

Para este tipo de sistema produtivo a resolução do problema da implantação fabril engloba duas fases:

- (i) implantação intracelular – obtenção da melhor disposição das máquinas em cada uma das células, por forma a minimizar os custos dos transportes intracelulares e
- (ii) implantação intercelular – determinação da melhor localização relativa das células na área fabril, por forma a minimizar o custo de transporte entre células.

Na primeira fase, os recursos a serem colocados são as máquinas que integram cada uma das células e, na segunda fase, são as células cuja configuração geométrica foi definida na primeira fase. Assim, a resolução do problema das implantações fabris em sistemas de produção celulares obriga à utilização de procedimentos que mantenham a configuração geométrica dos recursos.

Por outro lado, em termos dos objetivos a considerar, a redução dos custos de movimentação de materiais é perfeitamente adequada no caso dos SPC, uma vez que uma das principais ideias subjacentes a este tipo de organização do sistema produtivo é a redução do fluxo intercelular e conseqüentemente das movimentações de materiais.

O procedimento desenvolvido considera secções com configuração geométrica fixa e tem como objetivo a minimização do custo total de transporte. O procedimento adequa-se à definição da implantação intracelular ou da implantação intercelular mas pode, contudo, aplicar-se à definição de outros tipos de implantação. Dada a

complexidade do problema foram utilizados algoritmos genéticos por forma a alargar o número de soluções analisadas e obter uma boa solução final.

6.2. Algoritmos genéticos para o problema das implantações fabris em sistemas de produção celulares

Nesta secção apresenta-se o procedimento para a resolução do problema das implantações fabris em sistemas de produção celulares. Este permite definir a disposição relativa de: máquinas em células de produção – implantação intracelular – ou células na área fabril – implantação intercelular.

As principais características da heurística proposta são as seguintes:

- o objetivo é o de minimizar o custo global de transporte de materiais;
- a medida de distância utilizada é a retilinear (isto é, a distância entre dois pontos quaisquer - (x_i, y_i) e (x_j, y_j) - é dada por $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$);
- os recursos a implantar (máquinas ou células) têm uma forma retangular com dimensões fixas;
- a cada recurso associa-se um ponto de entrada e um ponto de saída de materiais colocados em posições pré-definidas;
- cada recurso pode rodar 90° , 180° ou 270° em torno do seu centro geométrico, em relação à sua posição inicial
- a área de implantação considera-se pré-definida e pode conter restrições de zoneamento, que impedem a colocação de recursos em determinadas áreas, e áreas pré-atribuídas a equipamentos específicos;

O custo global de transporte é calculado utilizando a expressão proposta por Vilarinho e Guimarães (2003), a qual se baseia no seguinte conjunto de pressupostos:

- (i) uma operação de transporte de materiais movimenta um tipo de componente, k , entre um par de recursos (i,j) utilizando sempre o mesmo tipo de equipamento;
- (ii) o fluxo associado a cada operação de transporte ao longo do horizonte de planeamento, f_{ij}^k , é conhecido e corresponde ao número de unidades transportadas do componente k entre os recursos i e j ;

- (iii) o lote de transporte do componente k entre os recursos i e j , s_{ij}^k , corresponde à quantidade transportada em cada operação de transporte e é constante ao longo do horizonte de planeamento;
- (iv) o tempo utilizado em cada operação de transporte entre os recursos i e j para o componente k , t_{ij}^k , decompõe-se em três parcelas: tempo de carga, l_{ij}^k , tempo de descarga, u_{ij}^k , e tempo de deslocação, o_{ij}^k ;
- (v) o tempo de deslocação é proporcional à distância entre os recursos, d_{ij} , sendo a constante de proporcionalidade a velocidade do equipamento de transporte para a operação em causa, v_{ij}^k ;
- (vi) o custo por unidade de tempo da operação de transporte do componente k entre os recursos i e j , c_{ij}^k , depende exclusivamente do tipo de equipamento de movimentação de materiais utilizado;
- (vii) o número de operações de transporte entre os recursos i e j necessárias para transportar todas as unidades do componente k , ao longo do período do planeamento, é $r_{ij}^k = \left\lceil \frac{f_{ij}^k}{s_{ij}^k} \right\rceil$.

O custo global de transporte, considerando número de diferentes tipos de componentes a serem transportados entre os recursos i e j (n_{ij}) é então dado pela seguinte expressão:

$$TC = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_{ij}} r_{ij}^k c_{ij}^k \left(l_{ij}^k + u_{ij}^k + \frac{d_{ij}}{v_{ij}^k} \right) \quad (6.1)$$

Na secção seguinte apresenta-se o procedimento baseado em algoritmos genéticos para a resolução do problema das implantações fabris em sistemas de produção celulares. Na resolução deste problema começa-se, usualmente, por definir a implantação intracelular e só depois se constrói a implantação intercelular, sendo o procedimento proposto aplicável em ambos os casos.

6.2.1. Aplicação do algoritmo genético

O problema das implantações fabris em sistemas de produção celulares pode ser incluído no conjunto de problemas NP-difíceis e, por isso, a utilização de heurísticas para a sua resolução é um procedimento recorrente. A adoção de uma técnica baseada em algoritmos genéticos resulta do facto de a sua aplicação a problemas desta classe ter comprovadamente apresentado bons resultados (Tavakkoli-Moghaddain e Shayan, 1998).

A heurística proposta para a resolução do problema da implantação de células de fabrico, inclui duas fases: (i) pesquisa e (ii) colocação. Na fase de pesquisa são definidas sequências de colocação das células, para além da rotação de cada uma. De notar que para um problema com N células o número de potenciais soluções da fase de pesquisa é de $4N.N!$ dado que podemos ter $N!$ sequências de colocação das células podendo, cada uma delas, ter quatro posições diferentes de rotação (0° , 90° , 180° , 270°). Esta dimensão do espaço de soluções claramente justifica o recurso a uma técnica de pesquisa adaptativa. Na fase de colocação, as soluções geradas na primeira fase são decodificadas na forma de uma implantação bidimensional, como se explicará na secção 6.2.1.3.

O procedimento proposto baseia-se numa série de pressupostos, nomeadamente:

- o nível de produção é estável para o horizonte de planeamento,
- a produção pode ser representada adequadamente por um conjunto limitado de componentes cujas quantidades a produzir no horizonte de planeamento são conhecidas,
- o fluxo entre cada célula i e j é conhecido, sendo f_{ijk} o número de componentes do tipo k movimentado entre as células i e j durante o horizonte de planeamento,
- utiliza-se sempre o mesmo tipo de equipamento de transporte para movimentar o componente k entre as células i e j ,
- cada célula i tem uma forma regular de dimensões conhecidas: $W_i \times H_i$,
- para cada célula i as coordenadas dos pontos de carga (x_{p_i}, y_{p_i}) e descarga (x_{d_i}, y_{d_i}) (colocados na fronteira retangular da célula) são definidos

relativamente ao centro geométrico da célula (x_i, y_i) ,

- as células podem rodar em torno do seu centro geométrico em 90° , 180° ou 270° relativamente à respetiva posição inicial,
- um conjunto de restrições de zoneamento que forcem duas células a serem colocadas de forma adjacente (ou de forma não adjacente) pode ser garantido através de junção das células (ou introduzindo uma penalidade elevada no fluxo entre as mesmas),
- as restrições de zoneamento podem também incluir a pré-afetação de células a locais específicos,
- a posição dos pontos de carga e descarga da implantação (de forma retangular) são conhecidos, caso contrário assume-se que esses pontos estão localizados no canto noroeste da instalação,
- a área total da implantação é suficiente para acomodar a totalidade das células.

Os passos principais e os parâmetros utilizados no algoritmo genético encontram-se descritos nas secções seguintes.

6.2.1.1. Codificação

A sequência de colocação das N secções (células ou máquinas) é representada por uma matriz de dimensão $2 \times N$ (ver figura 6.1). A primeira linha da matriz representa a sequência de colocação enquanto que a segunda linha indica a rotação da secção (1 indica que não houve rotação a partir da posição inicial, 2 indica uma rotação de 90° , 3 de 180° e 4 de 270°).

2	1	5	4	3
1	1	4	2	3

Figura 6.1 - Representação da sequência de colocação

6.2.1.2. População inicial

A linha que representa a rotação das células é iniciada com valores unitários, ou seja assume-se que nesta população inicial as secções serão colocadas com uma rotação de 0°. Assumindo que cada célula foi classificada de 1 a N, a sequência de colocação destas é definida de acordo com o procedimento apresentado na figura 6.2.

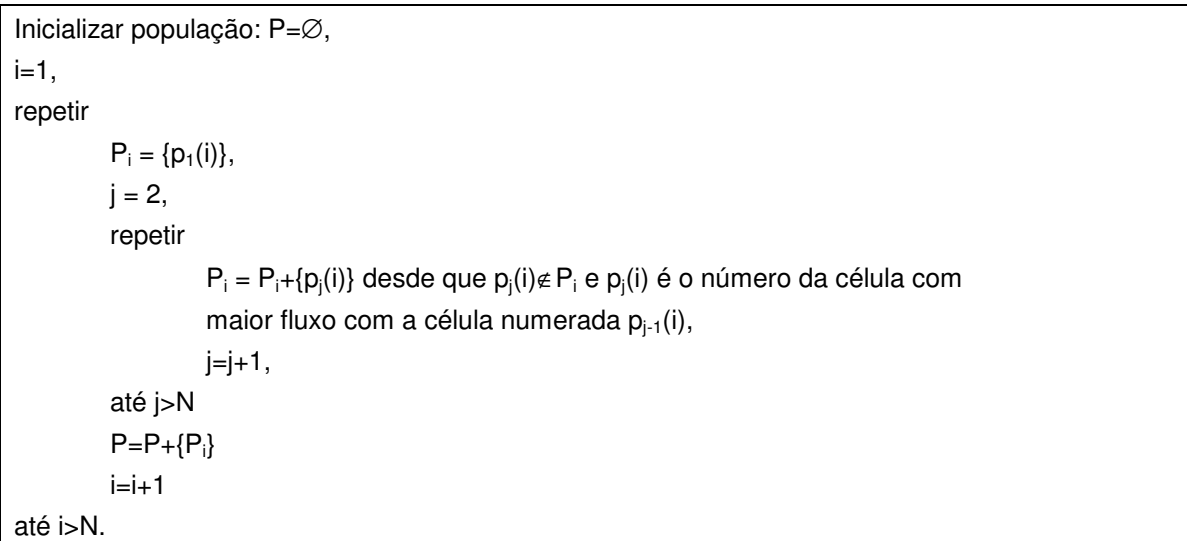


Figura 6.2 - Procedimento de geração da população inicial

São assim criados indivíduos em quantidade igual ao número de células. Cada célula vai iniciar a sequência de apenas um indivíduo sendo as restantes células, dessa sequência, escolhidas de acordo com o valor do fluxo (mais elevado) que têm com a célula escolhida imediatamente antes.

6.2.1.3. Heurística de colocação

Esta heurística utiliza a sequência representada por indivíduo (e.g., P_i) e constrói uma implantação bidimensional de acordo com o procedimento seguinte:

- (i) A célula que aparece em primeiro lugar na sequência (p_i(1)) é colocada de forma a que o seu ponto de entrada fique o mais perto possível do ponto de entrada da implantação.
- (ii) As células subsequentes (p_i(j), j=2,...,N) são colocadas de modo a que o ponto de entrada da célula p_i(j) fique o mais perto possível do ponto de saída

da célula $p_i(j-1)$.

A colocação das secções é feita através da análise de oito potenciais posições para a nova secção a colocar sendo a nova secção alinhada com a secção colocada anteriormente.

Na figura 6.3 são apresentadas, a título de exemplo, duas secções: a cinzento a secção já colocada e, à esquerda, a nova secção a colocar junto da primeira. Na figura 6.4 mostram-se as oito posições que serão testadas (representadas por a, b, c, d, e, f, g, h), podendo a nova secção ser colocada em torno da anterior de modo a ficar alinhada com duas das arestas da mesma (por exemplo, para a posição 'a' o alinhamento é feito com a aresta superior e a aresta direita e para a posição 'h' o alinhamento é feito com a aresta inferior e a aresta esquerda).

Naturalmente que, quando se aplica o passo (ii) e se escolhe a posição da nova secção, tanto as restrições de zoneamento como os limites da implantação têm que ser considerados.



Figura 6.3 - Secções a colocar

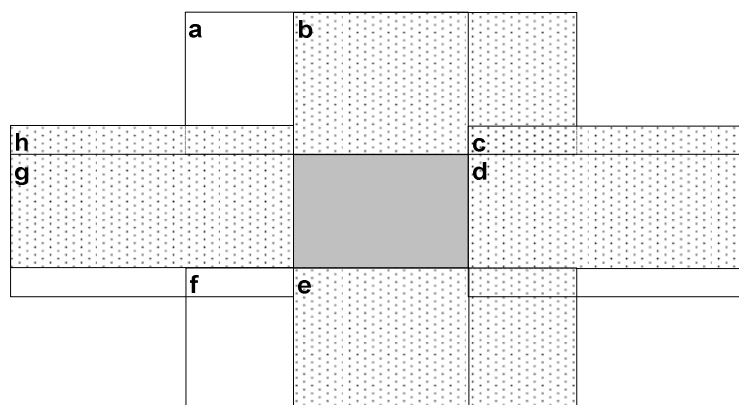


Figura 6.4 - Oito possibilidades de colocação da nova secção

6.2.1.4. Função de *fitness*

O valor de *fitness* de cada indivíduo corresponde ao valor do custo total de movimentação de material associado àquela implantação. Esse custo é calculado recorrendo à expressão 6.1.

6.2.1.5. Seleção por torneio

Esta técnica para seleção da população (descrita por Falkenauer, 1999), já utilizada no capítulo anterior, representa mais adequadamente o comportamento natural dos indivíduos, simulando a competição que surge em encontros aleatórios.

A figura 6.5 resume esse procedimento de seleção.

```
{List}=∅  
i=1  
repetir  
    escolhe aleatoriamente dois indivíduos da população corrente  
    compara o valor de fitness dos dois competidores  
    coloca o pior indivíduo na i-ésima posição da lista  
    devolve o melhor indivíduo à população corrente  
    i=i+1  
até i=N
```

Figura 6.5 - Procedimento de seleção

A lista que resulta deste processo é usada para classificar os indivíduos, permitindo selecionar os indivíduos que irão dar origem à próxima geração.

6.2.1.6. Substituição da população

Para este processo manteve-se a mesma lógica usada no capítulo anterior (ver ponto 5.3.1.6.). Basicamente mantêm-se duas populações (a população corrente e a futura), sendo que, em cada geração, uma nova população é construída para substituir a população corrente.

Os indivíduos da população futura provêm de duas origens: reprodução (indivíduos da população corrente que são copiados para a geração seguinte) e recombinação

(indivíduos que resultam da recombinação de dois progenitores da população corrente). Após a nova população ter sido criada, e antes de substituir a população corrente, é-lhe aplicado o operador de mutação.

Utilizou-se, mais uma vez, uma taxa de reprodução de 0,5 que implica que $\lfloor N/2 \rfloor$ dos melhores indivíduos da população são transferidos para a geração seguinte. Os restantes $\lceil N/2 \rceil$ indivíduos da população futura resultam da aplicação do operador de recombinação aos $\lceil N/2 \rceil$ melhores indivíduos da lista de classificação.

6.2.1.7. Operadores

O operador de recombinação é aplicado a um conjunto de indivíduos da população corrente, da mesma forma que anteriormente (ver ponto 5.3.1.7.), e que se resume na figura 6.6.

<pre>Se $\lfloor N/2 \rfloor = \lceil N/2 \rceil$ e ambos ímpares $j = \lceil N/2 \rceil + 1$ $k = \lfloor N/2 \rfloor$ Se $\lfloor N/2 \rfloor \neq \lceil N/2 \rceil$ e $\lceil N/2 \rceil$ ímpar $j = \lceil N/2 \rceil - 1$ $k = \lfloor N/2 \rfloor + 1$ senão $j = \lceil N/2 \rceil$ e $k = \lfloor N/2 \rfloor$ Para $i=0$ até $(j/2)-1$ escolhe o indivíduo na $(k+i)$-ésima posição da lista escolhe o indivíduo na $(N-i)$-ésima posição da lista recombina os dois indivíduos insere os dois descendentes na população futura stop</pre>

Figura 6.6 - Procedimento de recombinação

É utilizado um operador tradicional conhecido como *partial match crossover operator*, já referido anteriormente (na secção 5.3.1.7.).

Nesta situação, a aplicação do operador à primeira linha de cada indivíduo, levaria à obtenção de dois descendentes (a e b), criados a partir de dois progenitores (A e B), de acordo com o esquema apresentado na figura 6.7. O primeiro descendente (a) é obtido combinando o sector inicial e o sector final do progenitor A com o sector central do

progenitor B. O segundo descendente (b), por sua vez, utiliza o sectores inicial e final do progenitor B e a parte central do progenitor A. De notar que a rotação de cada uma das secções (definida na segunda linha de cada indivíduo) manter-se-ia a mesma no processo de recombinação.

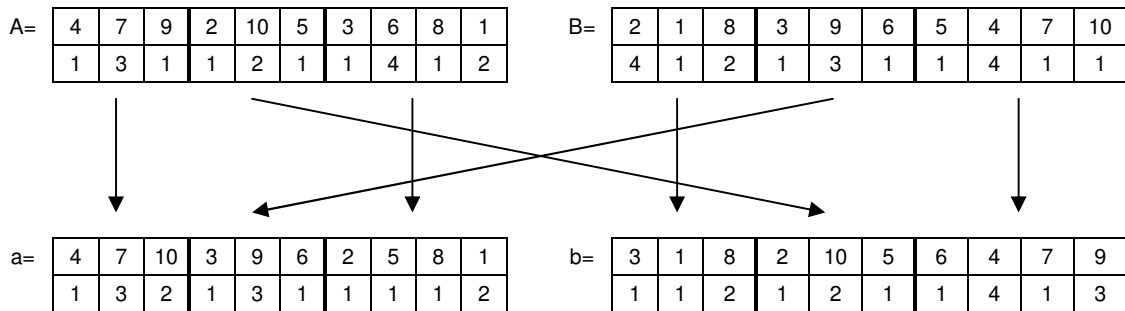


Figura 6.7 - Operador de recombinação

Por seu lado o operador de mutação é aplicado a $\lceil N/2 \rceil$ indivíduos da futura população antes que esta se transforme na população corrente. Esses indivíduos são escolhidos aleatoriamente e a célula i desses indivíduos (sendo i escolhido aleatoriamente entre 1 e N) é rodada 90° contra o sentido do ponteiro dos relógios (ou seja, se tivesse uma orientação de 90° passaria para uma orientação de 180°).

6.2.1.8. Critério de paragem

O processo termina se o melhor indivíduo permanece o mesmo após várias gerações. Dado que a dimensão do espaço de pesquisa está diretamente relacionada com o número de células (N) e dado que em cada geração existem N indivíduos, optou-se por parar o procedimento se após N gerações não houver nenhuma melhoria no melhor indivíduo.

6.2.2. Ilustração numérica

Um exemplo com cinco células é apresentado nesta secção para ajudar a explicar e clarificar o procedimento. Neste exemplo a qualidade das soluções é avaliada utilizando uma versão simplificada da expressão do custo total de transporte, considerando apenas o número de viagens entre células como forma de ponderar as distâncias entre estas. Esta simplificação assume que os tempos de carga e descarga estão incluídos no tempo

de transporte e que se utiliza o mesmo sistema de transporte de material para realizar todas as viagens.

A nova função TC resume-se, assim, à expressão:

$$TC' = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} \cdot d_{ij} \quad (6.2)$$

A dimensão da implantação é de 50x50 e utiliza-se o ponto de entrada do material definido por defeito (o canto superior esquerdo). Na tabela 6.1 apresentam-se os dados geométricos relevantes de cada célula e na figura 6.8 os fluxos intercelulares considerados neste exemplo.

Tabela 6.1 - Dados geométricos das células

Número da célula	Largura (W _i)	Altura (H _i)	Ponto de carga (x _{p_i} , y _{p_i})	Ponto de descarga (x _{d_i} , y _{d_i})
1	10	10	(5, -5)	(5, 5)
2	10	20	(-5, -5)	(5, -5)
3	20	20	(10, 10)	(10, 0)
4	10	30	(-15, 0)	(15, 0)
5	20	30	(10, 10)	(5, -10)

De notar que as coordenadas dos pontos de entrada e saída são definidas em relação ao centro geométrico da célula.

i \ j	1	2	3	4	5
1	--	14	10	18	0
2	0	--	8	14	0
3	6	8	--	3	5
4	7	0	6	--	28
5	0	10	0	7	--

Figura 6.8 - Número de viagens efetuadas entre as células i e j, para todos os componentes k

A população inicial gerada pela heurística apresenta-se na figura 6.9.

1	4	5	2	3
1	1	1	1	1

2	4	5	1	3
1	1	1	1	1

3	2	4	5	1
1	1	1	1	1

4	5	2	3	1
1	1	1	1	1

5	2	4	1	3
1	1	1	1	1

Figura 6.9 - Indivíduos iniciais

A descodificação desses indivíduos dá origem a implantações bidimensionais. Na figura 6.10 está a implantação resultante da descodificação do primeiro indivíduo da população.

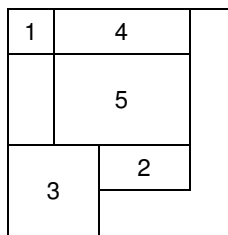


Figura 6.10 - Exemplo da implantação

Na figura 6.11 estão as distâncias entre os pontos de entrada e de saída das diferentes células, para a implantação apresentada na figura 6.10. Com base nesses valores consegue-se determinar que o valor de *fitness* desse indivíduo é de 5.100 unidades monetárias.

i \ j	1	2	3	4	5
1	--	55	40	35	40
2	55	--	5	50	15
3	40	25	--	45	10
4	5	60	45	--	45
5	35	30	45	10	--

Figura 6.11 - Matriz de distâncias (d_{ij})

Esta avaliação é feita para cada indivíduo da população e neste caso os três melhores

são reproduzidos para a população futura.

A lista de classificação é gerada escolhendo aleatoriamente e comparando dois indivíduos até que os cinco indivíduos estejam na lista. Os dois melhores indivíduos da lista são recombinados, com recurso ao operador de recombinação, dando origem aos restantes dois indivíduos da população futura. Por exemplo se recombínássemos dois indivíduos da população inicial (A e B), seriam obtidos os descendentes (a) e (b), que se apresentam na figura 6.12.

A=	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>2</td><td>4</td><td>5</td><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	2	4	5	1	3	1	1	1	1	1
2	4	5	1	3							
1	1	1	1	1							

B=	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>4</td><td>5</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	4	5	2	3	1	1	1	1	1	1
4	5	2	3	1							
1	1	1	1	1							

a=	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>5</td><td>4</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	5	4	2	3	1	1	1	1	1	1
5	4	2	3	1							
1	1	1	1	1							

b=	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>4</td><td>2</td><td>5</td><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	4	2	5	1	3	1	1	1	1	1
4	2	5	1	3							
1	1	1	1	1							

Figura 6.12 – Recombinação de indivíduos

Para finalizar a construção da população futura, três indivíduos dessa população são escolhidos e, por exemplo, a célula 3 em todos eles rodaria 90º em sentido contrário ao dos ponteiros do relógio

Por exemplo, se o descendente (a) fosse escolhido, passaria a ser

5	4	2	3	1
1	1	2	1	1

5				
4				
2	3	1		

Figura 6.13 - Indivíduo após mutação e implantação resultante

O processo é repetido até que o critério de paragem seja atingido, neste caso isso implicaria não se registar qualquer evolução no melhor indivíduo durante cinco gerações.

Para este exemplo, a melhor solução na população inicial apresentava um valor de *fitness* de 3.870 unidades monetárias, e a melhor solução final um valor 1.619 unidades monetárias, o que corresponde a um melhoramento de 58% no valor de *fitness* da solução.

6.2.3. Experiência computacional

Procurou-se, com o desenvolvimento deste procedimento, abordar uma série de aspetos essenciais na definição de uma implantação celular. A utilização de configurações geométricas fixas e pontos de entrada e saída de material implica a definição de informação adicional para que se obtenha um problema de teste. Optou-se por gerar esses problemas aleatoriamente ao invés de fazer adaptações elaboradas de instâncias disponíveis, adaptações essas que impediriam uma comparação válida de resultados.

Foram assim criados seis problemas com dimensões entre as 20 e as 70 células/secções e foram realizadas 10 experiências para cada problema (ver tabela 6.2).

Tabela 6.2 - Resultados da experiência computacional

Dimensão do problema (nº de células)	Função objetivo				Valor médio de melhoramento da função objetivo (%)
	Valor médio	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	
20	645.981	10.765	621.152	659.534	20%
30	2.914.735	52.222	2.826.075	2.994.960	14%
40	6.058.483	78.264	5.944.487	6.209.565	9%
50	12.648.403	192.828	12.338.119	12.983.040	14%
60	18.670.201	164.766	18.329.572	18.855.156	10%
70	30.692.994	259.520	30.369.777	31.100.611	14%

O procedimento apresenta um bom desempenho conseguindo melhorar substancialmente a função objetivo em relação às soluções iniciais, como se verifica pelos valores apresentados na última coluna da tabela 6.2.

Na figura 6.14 é também apresentado um gráfico que mostra a convergência do procedimento mostrando a evolução do valor da função objetivo (valor que se pretende minimizar) de uma das experiências realizadas. No caso apresentado nessa figura o valor da função objetivo melhorou substancialmente, tendo reduzido 24% relativamente à solução inicial.

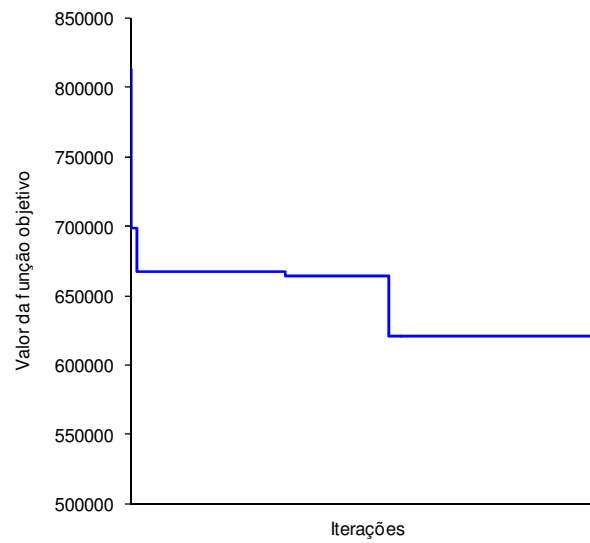


Figura 6.14 – Gráfico de convergência do procedimento

Os tempos de computação foram adequados, não tendo ultrapassado, para o problema de menor dimensão, os 11,2 segundos e para o de maior dimensão os 6,5 minutos.

6.3. Conclusões

A heurística desenvolvida para o problema do projeto de implantações fabris considerando secções com configuração geométrica fixa contempla diversos dos fatores importantes a ter em conta no projeto de sistemas de produção celulares eficazes, nomeadamente: (i) a utilização de secções com configurações geométricas fixas, (ii) a definição de pontos de entrada e de saída de material nos recursos (máquinas ou células) e (iii) a pesquisa da orientação mais favorável para o recurso.

Dadas estas condicionantes e o acréscimo de informação utilizada no procedimento, o esforço computacional manteve-se dentro de valores aceitáveis tendo o procedimento convergido para soluções melhores.

Em termos de desenvolvimento futuro, este passará pela aplicação deste procedimento a mais problemas (adaptados da literatura ou, idealmente obtidos pela análise de uma situação real).

Também será desejável realizar um estudo que permita avaliar se o aumento da percentagem de área livre (área da implantação menos o somatório das áreas das células) contribui, e em que medida, para o aumento da qualidade das soluções.

Será, também, relevante estender a heurística de forma a acomodar outros aspectos relevantes para o projeto de implantações fabris, tais como a inclusão de corredores, a possibilidade de surgirem secções com configurações geométricas fixas mas irregulares e implantações em mais que um piso.

Dois outros aspetos essenciais no projeto de uma implantação são: (i) a definição do sistema de transporte de materiais e (ii) o dimensionamento e posicionamento de espaços de armazenagem intermédios. Estas questões são, por si só, de extrema complexidade, contudo a sua integração conjunta no problema das implantações, caso possível, resultaria numa solução mais completa para o projeto de uma implantação fabril.

7

Conclusão

Conteúdo

- Conclusões gerais
- Perspetivas de desenvolvimento futuro

7.1. Conclusões gerais

No trabalho apresentado desenvolveu-se um conjunto de modelos e algoritmos com o intuito de contribuir para a resolução de diversos problemas inerentes ao planeamento de sistemas de produção celulares (tradicionais ou virtuais).

A principal contribuição deste trabalho para a investigação no planeamento de sistemas de produção celulares resulta do facto de os modelos e heurísticas desenvolvidos incluírem um conjunto de aspectos de grande relevância para a sua aplicação a ambientes industriais, ultrapassando algumas das limitações práticas inerentes a outros procedimentos reportados na literatura relevante.

O problema da formação das células de fabrico foi modelado conjuntamente com a afetação das operações às máquinas. A modelação conjunta do problema foi desenvolvida tendo por objetivo a minimização do valor do fluxo intercelular e a obtenção de uma maior flexibilidade em termos da criação de soluções alternativas. Deste modo, recorreu-se a um algoritmo de arrefecimento simulado que, graças à sua estrutura, permite pesquisar essas soluções alternativas. Estas são criadas através de dois tipos de movimentos: (i) mudança de operações para máquinas pertencentes a outras células e (ii) mudança de máquinas para células diferentes.

A utilização de uma nova forma de estruturar os dados, mais especificamente a matriz de fluxo entre operações, permitiu considerar o fluxo intercelular no objetivo do problema e possibilitou a modelação conjunta dos dois problemas já referidos.

O modelo foi testado com problemas encontrados na literatura, de uma forma limitada, devido à escassez de problemas que contenham toda a informação necessária para a aplicação do modelo.

Houve porém a possibilidade de obter dados de uma unidade industrial que pretendia avaliar a possibilidade de reorganização de uma parte da respetiva implantação. O teste do algoritmo com recurso a estes dados reais permitiu confirmar que o procedimento consegue obter soluções de qualidade, para problemas de grande dimensão, em tempo útil. Os resultados obtidos pelo procedimento não foram implementados (como já foi explicado no capítulo 4) mas permitiram discutir com os responsáveis na empresa algumas ideias, em relação à constituição das células, que permitiriam alguns ajustes e melhorias no sistema.

De seguida foi tratado o problema de balanceamento de uma célula de fabrico em que se assumiu que o comportamento de uma célula é semelhante ao de uma linha de produção assíncrona. O procedimento desenvolvido para a resolução deste problema (que teve por base o algoritmo de arrefecimento simulado) permite afetar as operações, que é necessário realizar nos componentes, aos diferentes recursos da linha, sendo que se podem considerar vários tipos de recursos. O objetivo proposto passa pela minimização do número de recursos a utilizar e, também, pelo equilíbrio da carga entre recursos, sendo comparados os recursos do mesmo tipo e, do mesmo modo, todos os recursos da linha.

Para o teste deste procedimento foram adaptadas instâncias utilizadas para o problema de balanceamento de linhas de montagem, sendo o comportamento do algoritmo bastante bom quer em termos de eficiência quer em termos de esforço computacional.

No que diz respeito ao problema da formação das células virtuais, este foi resolvido por recurso a um procedimento de algoritmos genéticos, que tem como objetivo a definição de famílias de componentes semelhantes, em termos de sequência de fabrico, e a afetação balanceada dessas famílias às diferentes máquinas. Para avaliar a semelhança entre componentes definiu-se, inicialmente, um coeficiente que apenas considerava o número de operações de fabrico em comum entre os componentes, sem entrar em linha de conta com a sequência em que essas operações são realizadas. Este coeficiente foi, posteriormente, substituído por um novo coeficiente de semelhança mais completo e que permite avaliar a semelhança entre componentes através da semelhança entre as suas sequências de fabrico.

O procedimento foi testado com um conjunto de exemplos gerados aleatoriamente devido à quantidade de informação necessária para a aplicação do modelo. Os testes realizados, com instâncias de menor e de maior dimensão, permitiram verificar a convergência das soluções do modelo e a sua eficácia independentemente da dimensão do problema a tratar.

O procedimento foi, de seguida, adaptado para ser aplicado ao problema da formação de células virtuais numa implantação distribuída. Nesta fase, considerou-se da mesma forma a semelhança entre componentes e dissemelhança entre famílias de componentes, a distribuição equitativa das cargas pelas diferentes máquinas, mas dado que os equipamentos estão espalhados pela área fabril, foram construídos mais dois coeficientes: (i) um para medir as distâncias a percorrer pelos componentes e (ii) um

outro que procura avaliar a complexidade do fluxo gerado.

O procedimento tornou-se mais exigente computacionalmente mas, mesmo para instâncias grandes, conseguiu melhorar a solução inicial em tempo útil.

Por último, foi desenvolvido um modelo para o problema das implantações fabris adequado ao planeamento de sistemas de produção celulares uma vez que considera secções com configuração geométrica fixa (sejam máquinas para definir a implantação intracelular, sejam já células para definir a implantação intercelular). A heurística desenvolvida para a resolução deste problema foi, mais uma vez, baseada em algoritmos genéticos, tendo a sua aplicação, a um conjunto de problemas gerados aleatoriamente, demonstrado que este consegue, mesmo em problemas de maior dimensão e com tempos de computação reduzidos, convergir para boas soluções.

O trabalho desenvolvido procurou ser abrangente em termos dos problemas tratados abordando diferentes aspetos do projeto de sistemas de produção celulares. Para cada problema foram considerados os pontos mais críticos em termos da implementação prática das soluções tendo havido a preocupação de os incluir nos procedimentos. A utilização de metaheurísticas surgiu naturalmente como forma de explorar um conjunto alargado de soluções.

7.2. Perspetivas de desenvolvimento futuro

Para além das questões apresentadas ao longo dos diferentes capítulos é importante salientar alguns outros aspetos relativos ao desenvolvimento futuro do trabalho.

No desenvolvimento deste trabalho foi possível aplicar, no caso do procedimento para o problema da formação de células de fabrico tradicionais, o método desenvolvido a uma situação real. Seria interessante, como forma extra de validação e também para difundir o trabalho no meio industrial, aplicar os restantes algoritmos a casos reais de empresas.

Não se encontraram instâncias, para testar os diferentes procedimentos, que incluíssem toda a informação requerida. A criação de uma base de instâncias que possam ser usadas nestas áreas de estudo e que permitissem a avaliação e a comparação de algoritmos, de forma mais estruturada, é um trabalho de imenso interesse (Papaioannou e Wilson, 2010).

Os fatores que levam à mudança da organização do sistema produtivo são um outro aspeto que deverá ser considerado em estudos futuros. Verifica-se na realidade a necessidade de estudar mais aprofundadamente as condições propícias à passagem de um sistema de produção por processo para um sistema de produção celular. Alguns fatores que poderão servir como indicadores da mudança são:

- as variações, quer em termos de quantidade quer em termos da variedade, dos produtos a fabricar;
- as mudanças no processo produtivo de certos componentes e nas restrições tecnológicas associadas a este;
- a diminuição ou falta de melhoramento do desempenho do sistema produtivo (níveis de inventário elevados, tempos de preparação consideráveis, fluxo interdepartamental elevado).

Há ainda uma grande lacuna, na literatura atual, de estudos referentes às condições que limitam a aplicação da tecnologia de grupo pura e que impelem as organizações a adotar sistemas híbridos, assim como regras ou modelos que auxiliem os decisores na definição desses sistemas híbridos. Todas estas questões, em torno dos sistemas híbridos, encontram-se por explorar, sendo uma área de imenso interesse prático que poderá proporcionar estudos e desenvolvimentos de bastante interesse no campo da

organização dos sistemas produtivos.

Um outro ponto interessante a desenvolver será o da utilização da estrutura de dados criada (a matriz de fluxo entre operações) para a criação de novas heurísticas e a aplicação de outro tipo de algoritmos, nomeadamente Algoritmos Genéticos, *Tabu Search*, *Scatter Search*, GRASP, entre outros.

No campo das células virtuais também a questão sobre quando alterar a estrutura do sistema deverá merecer alguma atenção.

Benjaafar *et al.* (2002) apresentam um conjunto de tendências atuais da indústria e do mercado que deverão influenciar fortemente a direção da investigação neste campo. Questões como: (i) aumento da subcontratação de serviços e da produção; (ii) a diferenciação tardia dos produtos; (iii) canais ou linhas de produção múltiplas ou (iv) equipamentos com capacidade ajustável ou portáteis, obrigam a mudanças na organização dos sistemas produtivos das empresas. Nesse trabalho os autores apontam ainda alguns exemplos dos novos tipos de implantação que começam a emergir, nomeadamente: implantações distribuídas, implantações modulares e implantações ágeis. Agregados ao projeto de cada um destes tipos de implantações existem diversos problemas e desafios que, mediante o trabalho desenvolvido até ao momento, surgem de uma forma natural como questões a serem analisadas e estudadas com maior profundidade em trabalho futuro.

Finalmente, a utilização de uma ferramenta como a simulação visual seria de extrema utilidade para analisar os resultados dos modelos e para comparar implantações e soluções diferentes para os diversos problemas. A aplicação da simulação permitiria a realização de diversos estudos comparativos entre diferentes configurações do sistema produtivo facilitando a análise e a avaliação de cenários alternativos.

Referências Bibliográficas

Adenso-Díaz, B. e Lozano, S. (2008), A model for the design of dedicated manufacturing cells, *International Journal of Production Research*, 46 (2), pp. 301-319.

Adil, G.K. e Ghosh, J.B. (2005), Forming GT cells incrementally using GRASP, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26 (11), pp. 1402-1408.

Adil, G.K., Rajamani, D. e Strong, D. (1993), A mathematical model for cell formation considering investment and operational costs, *European Journal of Operational Research*, 69 (3), pp. 330-341.

Adil, G.K., Rajamani, D. e Strong, D. (1997), Assignment allocation and simulated annealing algorithms for cell formation, *IIE Transactions*, 29 (1), pp. 53-67.

Agarwal, A. E Sarkis, J. (1998), A review and analysis of comparative performance studies on functional and cellular manufacturing layouts, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1), pp. 77-89.

Agrawal, A.K., Bhardwaj, P. e Srivastava, V. (2011), On some measures for grouping efficiency, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, pp. 789-798.

Ahi, A., Aryanezhad, M.B., Ashtiani, B. e Makui, A. (2009), A novel approach to determine cell formation, intracellular machine layout and cell layout in the CMS problem based on TOPSIS method, *Computers & Operations Research*, 36, pp. 1478-1496.

Akright, W.T. e Kroll, D.E. (1998), Cell formation performance measures – determining when to change an existing layout, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1), pp. 159-171.

Akturk, M.S. (2011), Joint cell loading and scheduling approach to cellular manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 49 (21), pp. 6321-6341.

Akturk, M.S. e Wilson, G.R. (1998), A hierarchical model for the cell loading problem of cellular manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 36 (7), pp. 2005-2023.

Arkat, J., Hosseini, L. e Farahani, M.H. (2011), Minimization of exceptional elements and voids in the cell formation problem using a multi-objective genetic algorithm, *Expert Systems with Applications*, 38, pp. 9597-9602.

Arkat, J., Saidi, M. e Abbasi, B. (2007), Applying simulated annealing to cellular manufacturing system design, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, pp. 531-536.

Arvindeh, B. e Irani, S.A. (1994), Cell formation: The need for an integrated solution of the subproblems, *International Journal of Production Research*, 32 (5), pp. 1197-1218.

Askin, R.G. e Standridge, C.R. (1993), *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, 1st edition, John Wiley & Sons, Singapore.

Atmani, A., Lashkari, R.S. e Caron, R.J. (1995), A mathematical programming approach to joint cell formation and operation allocation in cellular manufacturing, *International Journal of Production Research*, 33 (1), pp. 1-15.

Baykasoğlu A. (2003), Capability-based distributed layout approach for virtual manufacturing cells, *International Journal of Production Research*, 41 (11), pp. 2597-2618.

Baykasoglu, A., Gindy, N.N.Z. e Saad, S.M. (1998), A framework for the reconfiguration of cellular manufacturing systems, *IMS-98 - 2nd International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems Proceedings*, pp. 565-574.

Benjaafar, S., Heragu, S.S. e Irani, S.A. (2002), Next generation factory layouts: Research challenges and recent progress, *Interfaces*, 32 (6), pp. 58-76.

Black, J.T. e Hunter, S.L. (2003), *Lean Manufacturing Systems and Cell Design*, 1st edition, Society of Manufacturing Engineers, USA.

Boctor, F.F. (1991), A linear formulation of the machine-part cell formation problem, *International Journal of Production Research*, 29 (2), pp. 343-356.

Bortolini, M., Manzini, R. Accorsi, R. E Mora, C. (2011), An hybrid procedure for the machine duplication in cellular manufacturing systems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57, pp. 1155-1173.

Buffa, E.S. e Sarin, R.K. (1987), *Modern Production/Operations Management*, 8th edition, John Wiley & Sons, Singapore.

Burbidge, J.L. (1992), Change to group technology: Process organization is obsolete, *International Journal of Production Research*, 30 (5), pp. 1209-1219.

Canel, C., Al-Mubarak, F. e Khumawala, B.M. (2005), A comparison of focused cellular manufacturing to cellular manufacturing and job shop, *International Journal of Production Research*, 43 (11), pp. 2169-2194.

Chakravorty, S.S. e Atwater, J.B. (1996), A comparative study of line design approaches for serial production systems, *International Journal of Operations & Production Management*, 16 (6), pp. 91-108.

Chan, F. T. S. e Ng, E. Y. H. (2002), Comparative evaluations of buffer allocation strategies in a serial production line, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, pp. 789-800.

Chan, H.M. e Milner, D.A. (1982), Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacture, *Journal of Manufacturing Systems*, 1 (1), pp. 65-75.

Chandrasekhara, M.P. e Rajagopalan, R. (1986), MODROC: An extension of rank order clustering for group technology, *International Journal of Production Research*, 24 (5), pp. 1221-1233.

Chandrasekhara, M.P. e Rajagopalan, R. (1987), ZODIAC – An algorithm for concurrent formation of part-families and machine-cells, *International Journal of Production Research*, 25 (6), pp. 835-850.

Chen, C.-L., Cotruvo, N.A. e Baek, W. (1995), A simulated annealing solution to the cell formation problem, *International Journal of Production Research*, 33 (9), pp. 2601-2614.

Chen, C.-Y. e Irani, S.A. (1993), Cluster first-sequence last heuristics for generating block diagonal forms for a machine-part matrix, *International Journal of Production Research*, 31 (11), pp. 2623-2647.

Chen, S.-J. e Lin, L. (1999), Reducing total tardiness cost in manufacturing cell scheduling by a multi-factor priority rule, *International Journal of Production Research*, 37 (13), pp. 2939-2956.

Chiang, W.-C., Urban, T.L. e Xu, X. (2012), A bi-objective metaheuristic approach to unpaced synchronous production line-balancing problems, *International Journal of Production Research*, 50 (1), pp. 293-306.

Choobineh, F. e Nare, A. (1999), The impact of ignored attributes on a CMS design, *International Journal of Production Research*, 37 (14), pp. 3231-3245.

Clark, H.J. e Tannock, J.D.T. (1999), The development and implementation of a simulation tool for the assessment of quality economics within a cell-based manufacturing company, *International Journal of Production Research*, 37 (5), pp. 979-995.

Co, H.C. e Araar, A. (1988), Configuring cellular manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 26 (9), pp. 1511-1522.

Da Silveira, G. (1999), A methodology of implementation of cellular manufacturing, *International Journal of Production Research*, 37 (2), pp. 467-479.

Dallery, Y. e Le Bihan, H. (1999), An improved decomposition method for the analysis of production lines with unreliable machines and finite buffers, *International Journal of Production Research*, 37 (5), pp.1093-1117.

Davies, A., John, E. e Thomas, A. (2013), A flow direction weighting scheme for facility layout in cellular manufacturing, *International Journal of Productivity and Performance Management*, 62 (2), pp. 185-203.

Deif, A.M. (2012), Dynamic analysis of a lean cell under uncertainty, *International Journal of Production Research*, 50 (4), pp. 1127-1139.

Del Valle, A.G., Balarezo, S. e Tejero, J. (1994), A heuristic workload-based model to form cells by minimizing intercellular movements, *International Journal of Production Research*, 32 (10), pp. 2275-2285.

Deljoo, V., Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J., Deljoo, F. e Aryanezhad, M.B. (2010), Using genetic algorithm to solve dynamic cell formation problem, *Applied Mathematical Modelling*, 34, pp. 1078-1092.

Deutsch, S.J., Freeman, S.F. e Helander, M. (1998), Manufacturing cell formation using an improved p-median model, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1), pp. 135-146.

Díaz, J.A., Luna, D. e Luna, R. (2012), A GRASP heuristic for the manufacturing cell formation problem, *Top*, 20, pp. 679-706.

Djassemi (2005), A simulation analysis of factors influencing the flexibility of cellular manufacturing, *International Journal of Production Research*, 43 (10), pp. 2101-2111.

Drolet, J.R., Abdulnour, G. e Rheault, M. (1996), The cellular manufacturing evolution, *Computers & Industrial Engineering*, 31 (1/2), pp. 139-142.

Drolet, J.R., Montreuil, B. e Moodie, C.L. (1990), Virtual cellular manufacturing layout planning, *International Industrial Engineering Conference Proceedings*, San-Francisco, California, pp. 236-241.

Drolet, J.R., Montreuil, B. e Moodie, C.L. (1991), Empirical investigation of virtual cellular manufacturing systems, *International Conference on Computer Integrated Manufacturing (ICCIM'91)*, Singapore, pp. 323-326.

Drolet, J.R., Montreuil, B. e Moodie, C.L. (1995), Scheduling framework for virtual cellular manufacturing, *International Journal of Manufacturing System Design*, 1 (4), pp. 351-365.

Drolet, J.R., Moodie, C.L. e Montreuil, B. (1989), Scheduling factories of the future, *Journal of Mechanical Working Technology*, 20, pp. 183-194.

Durmusoglu, M.B. e Satoglu, S.I. (2011), Axiomatic design of hybrid manufacturing systems in erratic demand conditions, *International Journal of Production Research*, 49 (17), pp. 5231-5261.

Dutta, S.P., Lashkari, R.S., Nadoli, G. e Ravi, T. (1986), A heuristic procedure for determining manufacturing families from design-based grouping for flexible manufacturing systems, *Computers & Industrial Engineering*, 10 (3), pp. 193-201.

Eglese, R.W. (1990), Simulated Annealing: A tool for Operational Research, *European Journal of Operational Research*, 46, pp. 271-281.

Elbenani, B. e Ferland, J.A. (2012), An exact method for solving the manufacturing cell formation problem, *International Journal of Production Research*, 50 (15), pp. 4038-4045.

Falkenaer, E. (1999), Genetic Algorithms and Grouping Problems, 1st edition, John Wiley & Sons, Bristol, UK.

Fan, J. e Feng, D. (2013), Design of cellular manufacturing system with quasi-dynamic dual resource using multi-objective GA, *International Journal of Production Research*, DOI:10.1080/00207543.2012.748228.

Farrington, P.A. e Nazemetz, J.W. (1998), Evaluation of the performance domain of cellular and functional layouts, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1), pp. 91-101.

Feyzioglu, O. e Pierreval, H. (2009), Hybrid organization of functional departments and manufacturing cells in the presence of imprecise data, *International Journal of Production*

Research, 47 (2), pp. 343-368.

Flynn, B.B. e Jacobs, F.R. (1986), A simulation comparison of group technology with traditional job shop manufacturing, *International Journal of Production Research*, 24 (5), pp. 1171-1192.

Garza, O. e Smunt, T.L. (1994), Reducing flow between manufacturing cells: A sensitivity analysis, *International Journal of Production Research*, 32 (9), pp. 2131-2147.

Ghosh, T., Sengupta, S., Chattopadhyay, M. e Dan, P.K. (2011), Meta-heuristics in cellular manufacturing: A state-of-the-art review, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2, pp. 87-122.

Gung, R.R. e Steudel, H.J. (1999), A workload balancing model determining set-up time and batch size reductions in GT flow line workcells, *International Journal of Production Research*, 37 (4), pp. 769-791.

Hamamoto, S., Yih, Y. e Salvendy, G. (1999), Development and validation of genetic algorithm-based facility layout – a case study in the pharmaceutical industry, *International Journal of Production Research*, 37 (4), pp. 749-768.

Harhalakis, G., Lu, T., Minis, I. e Nagi, R. (1996), A practical method for design of hybrid-type production facilities, *International Journal of Production Research*, 34 (4), pp. 897-918.

He, D.W. e Kusiak, A. (1998), Designing an assembly line for modular products, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1), pp. 37-52.

Heragu, S. (1990), Modeling the machine layout problem, *Computers & Industrial Engineering*, 19 (1), pp. 294-298.

Heragu, S.S. e Gupta, Y.P. (1994), A heuristic for designing cellular manufacturing facilities, *International Journal of Production Research*, 32 (1), pp. 125-140.

Hillier, M. (2013), Designing unpaced production lines to optimize throughput and work-in-process inventory, *IIE Transactions*, 45 (5), pp. 516-527.

Holland, J.H. (1975), *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, USA.

Iman, M.H. e Mir, M. (1993), Automated layout of facilities of unequal areas, *Computers &*

Industrial Engineering, 24 (3), pp. 355-366.

Irani, S.A., Cohen, P.H. e Cavalier, T.M. (1992), Design of Cellular Manufacturing Systems, *Transactions of the ASME*, 114, pp. 352-361.

Irani, S.A., Zhang, H., Zhou, J., Huang, H., Udai, T.K. e Subramanian, S. (2000), Production Flow Analysis and Simplification Toolkit (PFAST), *International Journal of Production Research*, 38 (8), pp. 1855-1874.

Islam, K.M.S. e Sarker, B.R. (2000), A similarity coefficient measure and machine-parts grouping in cellular manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 38 (3), pp. 699-720.

Islir, A.A. (2005), Group technology by an ant system algorithm, *International Journal of Production Research*, 5 (43), pp. 913-932.

Iyer, A. e Askin, R.G. (1998), Modeling and simulating operating policies for manufacturing cells, *IIE Transactions*, 30 (9), pp. 785-794.

Jayaswal, S. e Adil, G.K. (2004), Efficient algorithm for cell formation with sequences data, machine replications and alternative process routings, *International Journal of Production Research*, 12 (42), pp. 2419-2433.

Jeon, G., Leep, H.R. e Parsaei, H.R. (1998), A cellular manufacturing system based on new similarity coefficient which considers alternative routes during machine failure, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1), pp. 21-36.

Jeong, K.-C. e Kim, Y.-D. (2000), Heuristics for selecting machines and determining buffer capacities in assembly systems, *Computers & Industrial Engineering*, 38 (3), pp. 341-360.

Johnson, D.J. (1998), An empirical investigation of factors influencing reorganizations to cellular manufacturing, Graduate School of the University of Wisconsin-Madison.

Kannan, V.R. (1997), A simulation analysis of the impact of family configuration on virtual cellular manufacturing, *Production Planning & Control*, 8 (1), pp. 14-24.

Kesen, S.E. e Güngör, Z. (2011), How important is batch splitting activity in scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs)?, *International Journal of Production Research*, 19 (6), pp. 1645-1667.

Kesen, S.E., Das, S.K. e Gungor, Z. (2010), A mixed integer programming formulation for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47, pp. 665-678.

Kesen, S.E., Toksari, M.D., Güngör, Z. e Güner, E. (2009), Analyzing the behaviours of virtual cells (VCs) and traditional manufacturing systems: Ant colony optimization (ACO)-based metamodels, *Computers & Operations Research*, 36, pp. 2275-2285.

Khilwani, N., Ulutas, B.H., Islier, A.A. e Tiwari, M.K. (2011), A methodology to design virtual cellular manufacturing systems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22 (4), pp. 533-544.

Khoo, L.P., Lee, S.G. e Yin, X.F. (2003), Multiple-objective optimization of machine cell layout using genetic algorithms, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2 (16), pp. 140-155.

King, J.R. (1980), Machine-component grouping in production flow analysis; an approach using rank order clustering algorithm, *International Journal of Production Research*, 18 (2), pp. 213-232.

King, J.R. e Nakornchai, V. (1982), Machine-component group formation in group technology: Review and extension, *International Journal of Production Research*, 20 (2), pp. 117-133.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. e Vecchi, M. (1983), Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220 (4598), pp. 671-680.

Kleiner, B.M., Drury, C.G. e Palepu, P. (1996), A computer-based productivity and quality management system for cellular manufacturing, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1), pp. 207-217.

Ko, K.-C. e Egbelu, P.J. (2003), Virtual cell formation, *International Journal of Production Research*, 41 (11), pp. 2365-2389.

Krafcik, J.F. (1988), Triumph of the lean production system, *Sloan Management Review*, 30(1), pp. 41-52.

Krishnan, K.K., Mirzaei, S., Venkatasamy, V. e Pillai, V.M. (2012), A comprehensive approach to facility layout design and cell formation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59, pp. 737-753.

Kuo, R.J., Su, Y.T., Chiu, C.Y., Chen, K.-Y. e Tien, F.C. (2006), Part family formation through fuzzy ART2 neural network, *Decision Support Systems*, 42, pp. 89-103.

Kusiak, A. (1985), The part families problem in Flexible Manufacturing Systems, *Annals of Operational Research*, 3 (6), pp. 279-300.

Kusiak, A. e Cho, M. (1992), Similarity coefficient algorithms for solving the group technology problem, *International Journal of Production Research*, 30 (11), pp. 2633-2646.

Kusiak, A. e Chow, W.S. (1987), An efficient cluster identification algorithm, *IEEE Transactions on Systems*, 17 (4), pp. 696-699.

Kusiak, A. e Heragu, S.S. (1987), Group technology, *Computers in Industry*, 9 (2), pp. 83-91.

Lahmar, M. e Benjaafar S. (2005), Design of distributed layouts, *IIE Transactions*, 37 (4), 303-318.

Lei, D. e Wu, Z. (2005), Tabu search-based approach to multi-objective machine-part cell formation, *International Journal of Production Research*, 24 (43) pp. 5241-5252.

Li, J., Chu, C.-H., Wang, Y. e Yan, W. (2007), An improved fuzzy clustering method for cellular manufacturing, *International Journal of Production Research*, 45 (5), pp. 1049-1062.

Li, M.-L. (2003), The algorithm for integrating all incidence matrices in multi-dimensional group technology, *International Journal of Production Economics*, 86 (2), pp. 121-131.

Li, X., Baki, M.F. e Aneja, Y.P. (2010), An ant colony optimization metaheuristic for machine-part cell formation problems, *Computers & Operations Research*, 37, pp. 2071-2081.

Lin, S.-W., Ying, K.-C e Lee, Z.-J. (2010), Part-machine cell formation in group technology using a simulated annealing-based meta-heuristic, *International Journal of Production Research*, 48 (12), pp. 3579-3591.

Logendran, R. (1993), A binary integer programming approach for simultaneous machine-part grouping in cellular manufacturing systems, *Computers & Industrial Engineering*, 24 (3), pp. 329-336.

Logendran, R. e Ramakrishna, P. (1997), A methodology for simultaneously dealing with machine duplication and part subcontracting in cellular manufacturing systems, *Computers & Operations Research*, 2 (24), pp. 97-116.

Lozano, S., Guerrero, F., Eguia, I. e Onieva, L. (1999), Cell design and loading in the presence of alternative routing, *International Journal of Production Research*, 37 (14), pp. 3289-3304.

Luong, L.H.S. (1993), A cellular similarity coefficient algorithm for the design of manufacturing cells, *International Journal of Production Research*, 31 (8), pp. 1757-1766.

Mahdavi, I. e Mahadaven, B. (2008), CLASS: An algorithm for cellular manufacturing system and layout design using sequence data, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, pp. 488-497.

Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M.M. e Solimanpur, M. (2010), Designing a mathematical model for dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and worker assignment, *Computers and Mathematics with Applications*, 60, pp. 1014-1025.

Mahdavi, I., Shirazi, B. e Paydar, M.M. (2008), A flow matrix-based heuristic algorithm for cell formation and layout design in cellular manufacturing system, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39, pp. 943-953.

Malakooti, B.B. (1994), Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization, *International Journal of Production Research*, 32 (9), pp. 2159-2178.

Mansouri, S.A., Moattar-Husseini, S.M. e Zegordi, S.H. (2003), A genetic algorithm for multiple objective dealing with exceptional elements in cellular manufacturing, *Production Planning & Control*, 5 (14), pp. 437-446.

Marsh, R.F., Shafer, S.M. e Meredith, J.R. (1999), A comparison of cellular manufacturing research presumptions with practice, *International Journal of Production Research*, 37 (14), pp. 3119-3138.

McAuley, J. (1972), Machine grouping for efficient production, *The Production Engineer*, 51 (2), pp. 53-57.

McDonald, T., Ellis, K.P., Van Aken, E.M. e Koelling, C.P. (2009), Development and application of a worker assignment model to evaluate a lean manufacturing cell, *International Journal of Production Research*, 47 (9), pp. 2427-2447.

McLean, C.R., Bloom, H.M. e Hopp, T.H. (1982), The virtual manufacturing cell, *Proceedings of Fourth IFAC/IFIP Conference on Information Control Problems in Manufacturing Technology*, Gaithersburg, MD, pp. 1-9.

McNamara, T., Shaaban, S. e Hudson, S. (2013), Simulation of unbalanced buffer allocation in unreliable unpaced production lines, *International Journal of Production Research*, 51 (6), pp. 1922-1936.

Mertins, K., Friedland, R. e Rabe, M. (2000), Capacity assignment of virtual manufacturing cells by applying lot size harmonization, *International Journal of Production Research*, 38 (17), pp. 4385-4391.

Michalewicz, Z. (1996), Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, Germany.

Mitrofanov, S.P. (1966), The scientific principles of group technology, Yorks: Boston Spa, UK: National Lending Library Translation.

Moon, C. e Gen, M. (1999), A genetic algorithm-based approach for design of independent manufacturing cells, *International Journal of Production Economics*, 60-61, pp. 421-426.

Morris, J.S. e Tersine, R.J. (1994), A simulation comparison of process and cellular layouts in a dual resource constrained environment, *Computers & Industrial Engineering*, 26 (4), pp. 733-741.

Mukhopadhyay, S.K., Gopalakrishnan, A. e Kripalani, M.K. (1995) Moments-based clustering techniques for manufacturing cell formation, *International Journal of Production Research*, 33 (4), pp. 1091-1115.

Mukhopadhyay, S.K., Sarkar, P. e Panda, R.P. (1994), Machine-component grouping in cellular manufacturing by multidimensional scaling, *International Journal of Production Research*, 32 (2), pp. 457-477.

Murali, R.V., Puri, A.B. e Prabhakaran, G. (2010), Artificial neural networks based predictive model for worker assignment into virtual cells, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2 (1), pp. 163-174.

Nahmias, S. (2008), Production and Operations Analysis, 5th edition, McGraw-Hill International Edition, Singapore.

Nomden, G., Slomp, J. e Suresh, N.C. (2006), Virtual manufacturing cells: A taxonomy of past research and identification of future research issues, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17, pp. 71-92.

Norman, B.A., Thammaphornphilas, W., Needy, K.L., Bidanda, B. e Warner R.C. (2002), Worker assignment in cellular manufacturing considering technical and human skills, *International Journal of Production Research*, 40 (6), pp. 1479-1492.

Nouri, H. e Hong, T.S. (2012), A bacteria foraging algorithm based cell formation considering operation time, *Journal of Manufacturing Systems*, 31, pp. 326-336.

Okogbaa, O.G., Chen, M., Changchit, C. e Shell, R.L. (1992), Manufacturing system cell formation and evaluation using a new inter-cell flow reduction heuristic, *International Journal of Production Research*, 30 (5), pp. 1101-1118.

Oliveira, S., Ribeiro, J.F.F. e Seok, S.C. (2009), A spectral clustering algorithm for manufacturing cell formation, *Computers & Industrial Engineering*, 57, pp. 1008-1014.

Pailla, A., Trindade, A.R., Parada, V. e Ochi, L.S. (2010), A numerical comparison between simulated annealing and evolutionary approaches to the cell formation problem, *Expert Systems with Applications*, 37, pp. 5476-5483.

Pandian, R.S. e Mahapatra, S.S. (2009), Manufacturing cell formation with production data using neural networks, *Computers & Industrial Engineering*, 56, pp. 1340-1347.

Papaioannou, G. e Wilson, J.M. (2010), The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997-2008): Review and directions for future research, *European Journal of Operational Research*, 206, pp. 509-521.

Paydar, M.M. e Saidi-Mehrabad, M. (2013), A hybrid genetic-variable neighbourhood search algorithm for the cell formation problem based on grouping efficacy, *Computers & Operations Research*, 40, pp. 980-990.

Phillips, E.J. (1997), *Manufacturing Plant Layout: Fundamentals and fine points of optimum facility design*, 1st edition, Society of Manufacturing Engineers, USA.

Prombanpong, S. e Seenpipat, W. (2011), A worker assignment for machine cluster in the manufacturing cell, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEE IEEM)*, Singapore.

Raminfar, R., Zulkifli, N., Vasili, M. e Hong, T.S. (2012), An integrated model for the design of cellular manufacturing systems, *Proceedings of the 2nd International Conference on Chemical Engineering and Advanced Materials (CEAM 2012)*, Guangzhou, China.

Renna, P. e Ambrico, M. (2011), Loading policies in cellular manufacturing systems with remainder cell, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24 (7), pp. 661-675.

Saad, S.M., Baykasoglu, A. e Gindy, N.N.Z. (2002), An integrated framework for reconfiguration of cellular manufacturing systems using virtual cells, *Production Planning & Control*, 13 (4), pp. 381-393.

Sabuncuoglu, I., Erel, E. e Gocgun, Y. (2006), Analysis of serial production lines: Characterisation study and a new heuristic procedure for optimal buffer allocation, *International Journal of Production Research*, 44 (13), pp. 2499-2523.

Sangwan, K.S. e Kodali, R. (2004), Fuzzy part family formation for cellular manufacturing systems, *Production Planning & Control*, 15 (3), pp. 292-302.

Saraç, T. e Ozcelik, F. (2012), A genetic algorithm with proper parameters for manufacturing cell formation problems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23, pp. 1047-1061.

Sarker, B.R. (1996), The resemblance coefficients in group technology: A survey and comparative study of relational metrics, *Computers & Industrial Engineering*, 30 (1), pp. 103-116.

Sarker, B.R. e Mondal, S. (1999), Grouping efficiency measures in cellular manufacturing: A survey and a critical review, *International Journal of Production Research*, 37 (2), pp. 285-314.

Saxena, L.K. e Jain, P.K. (2011), Dynamic cellular manufacturing systems design – a comprehensive model, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, pp. 11-34.

Sayadi, M.K., Hafezalkotob, A. e Naini, S.G.J. (2013), Firefly-inspired algorithm for discrete optimization problems: An application to manufacturing cell formation, *Journal of Manufacturing Systems*, 32, pp. 78-84.

Scholl, A. (1993), Data of assembly line balancing problems, <<http://www.wiwi.uni->

jena.de/Entscheidung/>.

Scholl, A. (1999), *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, 2nd edition, Physica-Verlag, Heidelberg, Germany.

Seifoddini, H. (1990), Machine-component group analysis versus the similarity coefficient method in cellular manufacturing applications, *Computers & Industrial Engineering*, 18 (3), pp. 333-339.

Seifoddini, H. e Djassemi, M. (1996a), Improving the performance of cellular manufacturing by a dynamic part assignment approach, *Computers & Industrial Engineering*, 30 (4), pp. 719-726.

Seifoddini, H. e Djassemi, M. (1996b), A new grouping measure for evaluation of machine-component matrices, *International Journal of Production Research*, 34 (5), pp. 1179-1193.

Seifoddini, H. e Hsu, C.-P. (1994), Comparative study of similarity coefficients and clustering algorithms in cellular manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, 13 (2), pp. 119-127.

Selim, H.M., Askin, R.G. e Vakharia, A.J. (1998), Cell formation in group technology: Review, evaluation and directions for future research, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1), pp. 3-20.

Sengupta, K. (1997), A comparison of cells and assembly line layouts for manufacturing a mix of standard and custom products with product life cycles and product model, School of Business at Indiana University.

Shafer, S.M. e Meredith, J.R. (1993), An empirically-based simulation study of functional versus cellular layouts with operations overlapping, *International Journal of Operations & Production Management*, 13 (2), pp. 47-62.

Shafer, S.M. e Rogers, D.F. (1993), Similarity and distance measures for cellular manufacturing. Part I. A survey, *International Journal of Production Research*, 31 (5), pp. 1133-1142.

Shahin, A. e Janatyan, N. (2010), Group technology (GT) and lean production: A conceptual model for enhancing productivity, *International Business Research*, 3 (4), pp. 105-118.

Shargal, M., Shekhar, S. e Irani, S.A. (1995), Evaluation of search algorithms and clustering efficiency measures for machine-part matrix clustering, *IIE Transactions*, 27, pp. 43-59.

Simaria, A.S. e Vilarinho, P.M. (2001), The simple assembly line balancing problem with parallel workstations – a simulated annealing approach, *International Journal of Industrial Engineering*, 8 (3), pp. 230-240.

Singh, N. e Rajamani, D. (2011), Cellular Manufacturing Systems Design, Planning and Control, 1st edition reprinted, Chapman & Hall, London, UK.

Sobhanallahi, A. e Shayan, E. (1998), Effect of cell based team work in productivity improvement at a manufacturing company, *Computers & Industrial Engineering*, 35 (3), pp. 451-454.

Sofianopoulou, S. (1997), Application of simulated annealing to a linear model for the formulation of machine cells in group technology, *International Journal of Production Research*, 35 (2), pp. 501-511.

Solimanpur, M., Vrat, P. E Shankar, R. (2004), Ant colony optimization algorithm to the inter-cell layout problem in cellular manufacturing, *European Journal of Operational Research*, 157, pp. 592-606.

Song, S. e Hitomi, K. (1992), GT cell formation for minimizing the intercell parts flow, *International Journal of Production Research*, 30, pp. 2737-2753.

Srinivasan, G. (1994), A clustering algorithm for machine cell formation in group technology using minimum spanning tree, *International Journal of Production Research*, 32 (9), pp. 2149-2158.

Srinivasan, G. e Narendran, T.T. (1991), GRAFICS- a nonhierarchical clustering algorithm for group technology, *International Journal of Production Research*, 29 (3), pp. 463-478.

Srisansanee, K. (1997), Machine cell formation under probabilistic demand and uncertainty, University of Texas at Arlington.

Steudel, H.J. (1998), SIMSHOP: A job shop/cellular manufacturing simulator, *Journal of Manufacturing Systems*, 5 (3), pp. 181-189.

Stevenson, W.J. (2011), *Operations Management*, McGraw-Hill International Edition, 11th edition, New York, USA.

Su, C.-T e Hsu, C.-M (1998), Multi-objective machine-part cell formation through parallel simulated annealing, *International Journal of Production Research*, 36 (8), pp. 2185-2207.

Süer, G.A. e Bera, I.S. (1998), Optimal operator assignment and cell loading when lot-splitting is allowed, *Computers & Industrial Engineering*, 35 (3), pp. 431-434.

Süer, G.A., Saiz, M. e González, W. (1999), Evaluation of manufacturing cell loading rules for independent cells, *International Journal of Production Research*, 37 (15), pp. 3445-3468.

Suresh, G., Vinod, V.V. e Sahu, S. (1995), A genetic algorithm for facility layout, *International Journal of Production Research*, 33 (12), pp. 3411-3423.

Suresh, N.C. e Slomp, J. (2005), Performance comparison of virtual cellular manufacturing with functional and cellular layouts in DRC settings, *International Journal of Production Research*, 43 (5), pp. 945-979.

Tam, J.A. e Li, G.L. (1991), A hierarchical approach to the facility layout problem, *International Journal of Production Research*, 29 (1), pp. 165-184.

Tam, K.Y. (1990), An operation sequence based similarity coefficient for part families formations, *Journal of Manufacturing Systems*, 9 (1), pp. 55-68.

Tavakkoli-Moghaddain, R. e Shayan, E. (1998), Facilities layout design by genetic algorithms, *Computers & Industrial Engineering*, 35 (3-4), pp. 527-530.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Aryanezhad, M.B., Safaei, N. e Azaron, A. (2005), Solving a dynamic cell formation problem using metaheuristics, *Applied Mathematics and Computation*, 170, pp. 761-780.

Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A. e Tanchoco, J.M.A. (2010), *Facilities Planning*, 4th edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.

Vembu, S. e Srinivasan, G. (1997), Heuristics for operator allocation and sequencing in product-line-cells with manually operated machines, *Computers & Industrial Engineering*, 32 (2), pp. 265-279.

Venkataramanaiah, S. (2008), *Scheduling in cellular manufacturing systems: An heuristic*

approach, *International Journal of Production Research*, 46 (2), pp. 429-449.

Venugopal, V. (1999), Soft-computing-based approaches to the group technology problem: A state-of-the-art review, *International Journal of Production Research*, 37 (14), pp. 3335-3357.

Venugopal, V. e Narendran, T.T. (1994), Machine-cell formation through neural network models, *International Journal of Production Research*, 32 (9), pp. 2105-2116.

Vergara, H.A. e Kim, D.S. (2009), A new method for the placement of buffers in serial production lines, *International Journal of Production Research*, 47 (16), pp. 4437-4456.

Vilarinho, P.M. (1997), Concepção e desenvolvimento de um sistema de apoio ao projecto de implantações fabris, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

Vilarinho, P.M. e Guimarães, R.C. (2003), A procedure for the facility layout problem with fixed geometry resources, *International Journal of Industrial Engineering – Theory, Applications and Practice*, 10 (4), pp. 413-419.

Vilarinho, P.M. e Simaria, A.S. (2002), A two-stage method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations, *International Journal of Production Research*, 40 (6), pp. 1405-1420.

Vin, E., De Lit, P. e Delchambre, A. (2005), A multiple-objective grouping genetic algorithm for the cell formation problem with alternative routings, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16, pp. 189-205.

Wang, T.-Y., Lin, H.-C. e Wu, K.-B. (1998), An improved simulated annealing for facility layout problems in cellular manufacturing systems, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (2), pp. 309-319.

Wang, T.Y., Wu, K.B. e Liu, Y.W. (2001), A simulated annealing algorithm for facility layout problems under variable demand in cellular manufacturing systems, *Computers in Industry*, 46, pp. 181-188.

Wang, X., Tang, J. e Yung, K. (2010), A scatter search approach with dispatching rules for a joint decision of cell formation and parts scheduling in batches, *International Journal of Production Research*, 37 (14), pp. 3513-3534.

Wei, J.C. e Kern, G.M. (1989), Commonality analysis: A linear cell clustering algorithm for group technology, *International Journal of Production Research*, 27 (12), pp. 2053-2062.

Wemmerlöv, U. e Johnson, D.J. (1997), Cellular manufacturing at 46 user plants: Implementation experiences and performance improvements, *International Journal of Production Research*, 35 (1), pp. 29-49.

Williams, G.B., Davis, L.E. e Butchef, P.A. (1993), Cell based manufacturing and measures of performance, *Advances in Production Management Systems*, pp. 561-568.

Womack, J., Jones, D. e Roos, D. (1990), *The Machine That Changed the World*, 1st edition, Rawson Associates, New York, USA.

Won, Y. e Lee, K.C. (2001), Group technology cell formation considering operation sequences and production volumes, *International Journal of Production Research*, 13 (39), pp. 2755-2768.

Wu, N. e Salvendy, G. (1999), An efficient heuristic for the design of cellular manufacturing systems with multiple identical machines, *International Journal of Production Research*, 37 (15), pp. 3519-3540.

Wu, T.-H., Chang, C.-C e Chung, S.-H. (2008), A simulated annealing algorithm for manufacturing cell formation problems, *Expert Systems with Applications*, 34, pp. 1609-1617.

Wu, T.-H., Chung, S.-H. e Chang, C.-C. (2010), A water flow-like algorithm for manufacturing cell formation problems, *European Journal of Operational Research*, 205, pp. 346-360.

Yang, M.-S. e Yang, J.-H. (2008), Machine-part cell formation in group technology using a modified ART1 method, *European Journal of Operational Research*, 188, pp. 140-152.

Yang, M.-S., Hung, W.-L. e Cheng, F.-C. (2006), Mixed-variable fuzzy clustering approach to part family and machine cell formation for GT applications, *International Journal of Production Economics*, 103, pp. 185-198.

Yasuda, K. e Yin, Y. (2001), A dissimilarity measure for solving the cell formation problem in cellular manufacturing, *Computers & Industrial Engineering*, 39 (1), pp. 1-17.

Yin, Y. e Yasuda, K. (2005), Similarity coefficient methods applied to the cell formation

problem: A comparative investigation, *Computers & Industrial Engineering*, 48 (3), pp. 471-489.

Ying, K.-C., Lin, S.-W. e Lu, C.-C. (2011), Cell formation using a simulated annealing algorithm with variable neighbourhood, *European Journal of Industrial Engineering*, 5 (1), pp. 22-42.

Zhou, M. e Askin, R.G. (1998), Formation of general GT cells: An operation based approach, *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1), pp. 147-157.