

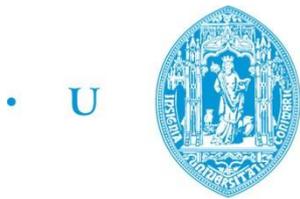
Marcel da Silva Van Der Kroef

Uma metodologia híbrida para o agendamento de tarefas numa linha de montagem reconfigurável

Tese de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial

Julho/2018





• C •

FCTUC

FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Uma metodologia híbrida para o agendamento de tarefas numa linha de montagem reconfigurável

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

Hybrid methodology for task assignment on a reconfigurable assembly line

Autor

Marcel da Silva Van Der Kroef

Orientadores

Professor Doutor Cristóvão Silva

Engenheira Isabela Maganha

Júri

Presidente Professor Doutor Luis Miguel Domingues Fernandes
Ferreira

Professor auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Cristóvão Silva

Professor auxiliar da Universidade de Coimbra

Doutor Samuel de Oliveira Moniz

Vogais Investigador do Instituto de Engenharia de Sistemas e
Computadores, Tecnologia e Ciência.

Orientador Professor Doutor Cristóvão Silva
Professor auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2018

*"Many times I've lied, many times I've listened, many times I've
wondered how much there is to know."*

— Led Zeppelin

Resumo

Nos últimos anos o sector industrial tem sofrido profundas alterações. O aumento das exigências dos clientes, a procura de maior diversidade de produtos e de tempos de entrega cada vez mais curtos, têm contribuído para um mercado muito mais volátil. Para colmatar alguns dos problemas que surgem com o aumento da volatilidade dos mercados são necessários sistemas de produção mais reconfiguráveis e flexíveis, capazes de se adaptarem aos mercados. Tendo como base o sistemas de produção reconfiguráveis e mais concretamente as linhas de montagem reconfiguráveis, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia híbrida capaz de nos ajudar a perceber quais as eventuais vantagens deste tipo de sistemas. Esta metodologia tem como base uma meta-heurística e um algoritmo de lista capaz de realizar a alocação das tarefas aos recursos disponíveis.

O problema em análise neste documento está relacionado com uma linha de montagem de motores para a indústria automóvel. Com esta metodologia pretende-se otimizar o tempo total de produção de uma determinada lista de motores, ou seja, o *makespan*, por forma a tornar o sistema mais eficiente, bem como perceber qual será a alocação e a movimentação dos recursos disponíveis, que neste caso se apresentam na forma de robôs móveis, que melhor satisfaz essa otimização.

Os resultados obtidos com o uso desta metodologia demonstram de que forma pequenas alterações na sequência de produção, na alocação, na movimentação e na quantidade de robôs afetam de uma maneira substancial o resultado final. Através da interpretação destes resultados, esta ferramenta poderá tornar-se útil no momento da tomada de decisão.

Palavras-Chave: sistemas de produção reconfiguráveis, linhas de montagem reconfiguráveis, algoritmo de lista, metodologia híbrida

Abstract

The industrial sector has faced profound changes in the last years. The increasing customers demand, the need of a greater product variety and shorter delivery times have contributed for a much more volatile market. In order to overcome the problems that emerge due to the increased market volatility, more reconfigurable and flexible manufacturing systems are needed, that allow a quickly adjustment to market changes. Taking into account the reconfigurable manufacturing systems and, more specifically, the reconfigurable assembly lines, this work presents the development of a hybrid methodology, which might help us understand the possible advantages of this type of system. This methodology combines a meta-heuristic and a list algorithm, that allocates the tasks to the available resources.

The problem analyzed in this paper belongs to an assembly line of motors of an automobile industry. This methodology intendeds to optimize the total time of producing a list of motors, i.e. the makespan, so it can turn the system more efficient, as well as determine the allocation and the displacement of the available resources, that in this case are mobile robots, that optimizes the objective function.

The results obtained with the use of this methodology demonstrate how small changes in the production sequence, allocation, displacement and quantity of resources may substantially affect the final result. Through the interpretation of these results this tool might be useful in decision making moments.

Keywords: reconfigurable manufacturing systems, reconfigurable assembly lines, list algorithm, hybrid methodology

Índice

Resumo	vii
Abstract	ix
Siglas	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento teórico	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura	3
2 Revisão da Literatura	5
3 Descrição do Problema	13
4 Metodologia	16
4.1 Algoritmo de lista proposto	17
5 Resultados	21
6 Conclusão	27
7 Referências Bibliográficas	29

Siglas

CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
RMS	<i>Reconfigurable Manufacturing System</i>
RAL	<i>Reconfigurable Assembly Line</i>
RAS	<i>Reconfigurable Assembly System</i>
DML	<i>Dedicated Manufacturing Line</i>
FMS	<i>Flexible Manufacturing System</i>
D	Motor do tipo diesel
G	Motor do tipo gasolina

Índice de Figuras

2.1	Custos associados ao tempo de <i>ramp-up</i> , adaptado de Lambert and Slater (1999)	6
2.2	Exemplo de configuração de RMS, adaptado de Koren et al. (2018)	9
2.3	Classificação dos sistemas de montagem, adaptado de Bi et al. (2007)	10
3.1	Esquemática da linha de montagem	13
3.2	Esquemática do posto de trabalho	14
3.3	Sequência das operações no primeiro posto de trabalho, para os dois tipos de motores	15
4.1	Metodologia híbrida utilizada	17
4.2	Pseudo-código da função de geração da lista inicial	18
4.3	Algoritmo de Lista	19
5.1	Diagrama de movimentação para um robô para lista [D,D,D,G,G]	24
5.2	Diagrama de movimentação para dois robôs para lista [D, D, D, G, G]	24
5.3	Diagrama de movimentação para três robôs para lista [D, D, D, G, G]	25

Índice de Tabelas

2.1	Diferenças entre soluções, adaptado de Koren and Shpitalni (2010)	6
5.1	Resultados para listas de um tipo de motor	22
5.2	Resultados da aplicação da meta-heurística	23
5.3	Apresentação dos resultados do algoritmo de lista	25

1 Introdução

1.1 Enquadramento teórico

Ao longo dos anos a indústria tem vindo a sofrer alterações profundas por forma a conseguir dar resposta às exigências económicas e sociais dos mercados. Como exemplo destas alterações podemos analisar a criação da primeira linha de montagem por Henry Ford em 1913 ou a indústria de manufatura japonesa que, através da *Toyota*, começou a formular técnicas de produção *lean* em 1970 (Koren et al., 2018). Estas duas transformações surgiram devido a exigências económicas e sociais dos mercados. O primeiro exemplo levou a uma produção mais eficiente em termos dos custos, enquanto que o segundo teve como efeito direto o aumento da preocupação referente à qualidade dos produtos.

No início da década de 1980, com o aparecimento das máquinas CNC, o conceito de sistemas flexíveis de produção foi introduzido para colmatar a elevada necessidade de customização em massa e para aumentar a capacidade de resposta às alterações frequentes no tipo de produto, tecnologia de produção e variação dos mercados (ElMaraghy, 2005).

No fim da década de 1990, com o aumento da globalização e o conseqüente aumento da imprevisibilidade dos mercados, o que acarretava grande variação na procura dos produtos bem como a introdução frequente de novos produtos, surgiu novamente um desafio para os sistemas de produção (Koren et al., 2018). Para tentar solucionar este problema foi introduzido nesta altura um novo conceito, denominado de Sistemas Reconfiguráveis de Produção (*Reconfigurable Manufacturing System - RMS*).

A introdução deste novo conceito tem como principal objetivo lidar, de forma rápida e eficiente, a elevada variação da procura dos mercados e a constante introdução de novos produtos, que tem como consequência o aumento da competitividade. Para tal, este tipo de sistema é desenhado de forma a que possa sofrer alterações rápidas tanto ao nível da máquina, alterando o hardware ou software da mesma, ou ao nível do sistema, adicionando ou retirando máquinas conforme a procura do mercado (Koren et al., 1999). Esta estrutura

ajustável permite responder de forma eficiente e escalável às diferentes alterações que ocorrem sobre o sistema.

Devido às suas características, um RMS é normalmente concebido para produzir uma família de produtos, uma vez que é capaz de se adaptar de forma rápida e eficiente. Em suma, um sistema reconfigurável pode ser definido como um sistema capaz de ser reestruturado de forma rápida para ajustar a capacidade de produção e a funcionalidade de uma dada família de produtos para responder as alterações repentinas do mercado (Koren et al., 1999).

Nas últimas décadas, os sistemas reconfiguráveis têm sido alvo de muitas investigações, principalmente relacionadas à projeção, geração e seleção da configuração ideal do sistema, e ao problema de planeamento dos processos (Renzi et al., 2014). Este trabalho pretende contribuir para o tema através do desenvolvimento de uma metodologia híbrida para o agendamento de tarefas numa linha de montagem reconfigurável.

1.2 Objetivos

Atualmente, a indústria automóvel enfrenta grandes dificuldades no que toca a sistemas reconfiguráveis. Neste contexto, este trabalho pretende analisar uma linha de montagem onde são produzidos dois tipos de motores para veículos automóveis. Estes motores têm que passar por dez postos de trabalho sequenciais, onde sofrem operações de montagem até estarem completos. Cada posto de trabalho tem um ou mais recursos associados, que poderão ser máquinas fixas ou seres humanos.

Cada tipo de motor pode sofrer operações diferentes no mesmo posto de trabalho, o que gera uma grande diversidade nas sequências de montagem. Esta é uma das razões pelas quais se introduziu neste sistema robôs móveis polivalentes, ou seja, com capacidade de executar as diferentes operações nos diferentes postos de trabalho.

Como objetivo deste documento, pretende-se demonstrar quais poderão ser as eventuais vantagens ou desvantagens da aplicação de um sistema reconfigurável numa linha de montagem de motores na indústria automóvel. Os resultados principais desta análise passam por perceber, para uma lista predefinida de motores a fabricar, qual o impacto da alteração de alguns elementos dessa lista no tempo total de produção de todos os motores (*makespan*), perceber qual a posição dos robôs em cada instante e testar algumas soluções para entender qual o número mais indicado de robôs a usar para aumentar a eficiência da linha de montagem e o rendimento dos robôs.

1.3 Estrutura

Este documento encontra-se dividido em 6 capítulos no qual se engloba a presente introdução. A descrição do conteúdo do capítulos é a seguinte:

Capítulo 1 descreve uma breve introdução ao tema debatido bem como os objetivos e estrutura deste documento.

Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura com base nos RMS e mais especificamente nos Sistemas de Montagem Reconfiguráveis (*Reconfigurable Assembly Systems - RAS*), as suas definições e características.

Capítulo 3 descreve o problema, em pormenor, que será analisado ao longo deste documento.

Capítulo 4 apresenta a metodologia usada para abordar o problema bem como a descrição do algoritmo aplicado.

Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos da execução do algoritmo e a discussão do seu significado.

Capítulo 6 refere alguns reparos finais e apresenta a conclusão do documento.

2 Revisão da Literatura

Atualmente a indústria, a nível mundial, é cada vez mais marcada pela forte competitividade, pelos rápidos avanços dos processos tecnológicos e pelas abruptas variações na procura do mercado. Estas condições obrigam, normalmente, à introdução de novos produtos ou ao aumento da capacidade produtiva em curtos intervalos de tempo (Koren and Shpitalni, 2010).

Para lidar com estas características é necessário um sistema de produção que seja capaz de se ajustar, rápida e eficazmente, às constantes pressões exercidas pelos mercados, um sistema robusto, altamente reconfigurável e capaz de se atualizar rapidamente, quer ao nível da capacidade quer ao nível da funcionalidade (Koren et al., 1999).

Podemos identificar três tipos de soluções de produção (Koren and Shpitalni, 2010). A primeira são as Linhas de Produção Dedicada (*Dedicated Manufacturing Lines* - DML) que representam linhas fixas com um baixo investimento, capazes de produzir um elevado volume, mas apenas de um tipo de produto o que poderá limitar a organização perante as constantes mudanças nos mercados. Outra das soluções passa pelos Sistemas Flexíveis de Produção (*Flexible Manufacturing System* - FMS) que permitem a produção de uma variedade de produtos na mesma linha. Normalmente estas linhas são compostas por máquinas CNC, o que implica uma taxa de produção inferior comparativamente aos sistemas DML, e possuem um custo por peça mais elevado, uma vez que existe elevado investimento em equipamento (Koren et al., 2018).

As duas soluções referidas anteriormente tem as suas vantagens, mas não são capazes de atender as necessidades atuais do mercado. Com base nessas necessidades surge o RMS, que poderá representar uma solução viável e economicamente sustentável para responder às exigências crescentes apresentadas pela indústria. Esta solução passa por tentar atingir funcionalidade variável e capacidade expansível, isto é, ser capaz de modificar facilmente a capacidade de produção, acrescentando ou removendo recursos (Koren and Shpitalni, 2010).

Como podemos observar na tabela 2.1, os RMS podem ser caracterizados por serem estruturas mutáveis, o que proporciona flexibilidade expansível e customizável, gerando sistemas

Tabela 2.1: Diferenças entre soluções, adaptado de Koren and Shpitalni (2010)

	DML	RMS	FMS
Estrutura do Sistema	Fixa	Mutável	Mutável
Estrutura da Máquinas	Fixa	Móvel	Fixa
Foco do Sistema	Peça	Família de peças	Várias peças
Expansível	Não	Sim	Sim
Flexibilidade	Não	Parcial	Geral
Produtividade	Muito Alta	Alta	Baixa
Custo por Unidade	Baixo	Médio	Razoável

reconfiguráveis com uma elevada capacidade de resposta. Ao comparar estes sistemas com os seus predecessores (DML e FMS), podemos concluir que os RMS conseguem ser uma solução equilibrada que tira o melhor dos restantes sistemas. Este sistema apresenta flexibilidade, dentro da mesma família de peças, apresentando uma produtividade mais elevada quando comparado com os FMS (Koren and Shpitalni, 2010).

Outro dos benefícios associados aos RMS prende-se com a sua agilidade e rapidez de integração de novos processos tecnológicos ou novos produtos, em sistemas já existentes, o que contribui para uma redução do *lead time* através da redução dos tempos de inatividade entre os processos de transição (Mehrabi et al., 2000).

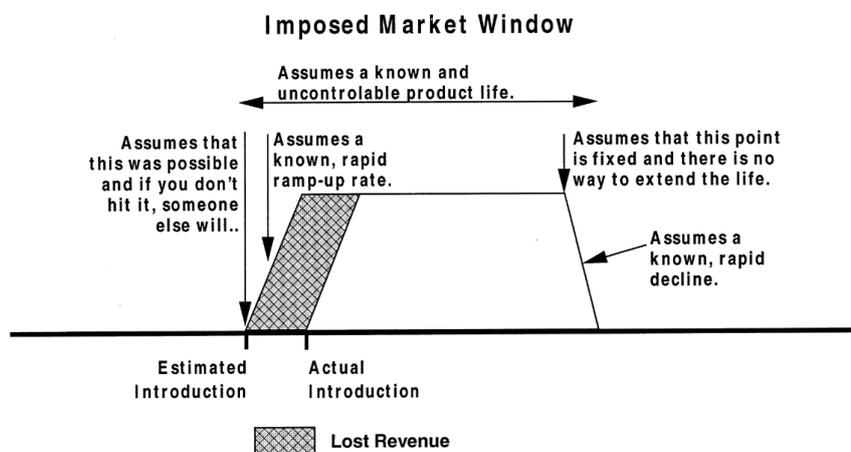


Figura 2.1: Custos associados ao tempo de *ramp-up*, adaptado de Lambert and Slater (1999)

Existe também uma menor perda de possíveis receitas com a redução do tempo de *ramp-up* (Figura 2.1), que representa o tempo desde a introdução do novo produto/processo até ao sistema atingir a capacidade máxima de utilização. Normalmente este tempo está associado a uma fase de experimentação e de melhoria, que a introdução de novo produto acarreta (Lambert and Slater, 1999).

Os RMS possuem seis características principais: escalabilidade, convertibilidade, diagnosticabilidade, customização, modularidade e integrabilidade (Koren and Shpitalni, 2010).

A *escalabilidade* passa pelo redimensionamento do sistema ao nível da capacidade de produção, adicionando/removendo recursos ao sistema ou alterando os componentes do mesmo por forma a ajustá-lo às flutuações do mercado (Koren et al., 2018).

A *convertibilidade* representa a capacidade que o sistema tem de transformar a sua funcionalidade atual para responder a novos requerimentos da produção, isto é, pode ser visto como a alteração rápida das ferramentas ou partes do software do sistema atual para se adaptar ao novo produto/processo (Koren et al., 1999).

A *diagnosticabilidade* diz respeito à monitorização em tempo-real da qualidade do produto, detetando precocemente as causas de defeitos. Como os sistemas de produção se tornam mais reconfiguráveis e são modificados mais frequentemente, torna-se vital que o sistema seja capaz de detetar, o mais cedo possível, os defeitos dos produtos, para que o sistema recém reconfigurado seja capaz de produzir peças de qualidade e diminuir o tempo de adaptação entre mudanças, quer sejam estas de produto ou de processo (Koren et al., 1999). Esta característica está diretamente relacionada com a diminuição do tempo de *ramp-up* referido e explicado anteriormente.

A *customização* pode ser dividida em dois aspetos distintos. Por um lado temos a customização da funcionalidades de controlo, criando diferentes módulos de controlo para cada tipo de produto/processo. Por outro, a customização da flexibilidade das máquinas, levando à customização das peças (Koren et al., 1999). Importa referir que esta customização apenas pode ser conseguida dentro da mesma família de peças uma vez que é nesse conjunto que os sistemas RMS atingem o seu objetivo.

Num RMS, todos os seus componentes (software, hardware, ferramentas e controlos) são modulares, apresentando, portanto, a característica da *modularidade*. Os componentes são compartimentalizados de maneira a formarem unidades de operações funcionais que podem depois ser manipuladas para obter a melhor configuração para cada caso específico (Koren et al., 1999).

A *integrabilidade* está relacionada com a capacidade de integrar todos esses módulos por

meio de interfaces mecânicas, de informação e de controlo por forma a facilitar a comunicação e tornando todo o sistema mais suscetível de integrar novas tecnologias (Koren et al., 1999).

Segundo Koren et al. (2018) existem seis princípios fundamentais a ter em conta na criação de um sistema RMS, que têm por base as seis características acima referidas:

1. A capacidade do sistema deve ser adaptável, em termos dos custos, à procura futura dos mercados.
2. O sistema deve ser projetado para poder ser adaptado a possíveis novos produtos exigidos pelos clientes.
3. O RMS deve ter um sistema de inspeção ótimo incorporado.
4. O sistema deve ser projetado em volta de uma família de produtos.
5. Deve maximizar a produtividade através da reconfiguração das operações e da alocação de tarefas às máquinas.
6. Deve ser efetuada manutenção de forma a aumentar a fiabilidade das máquinas e otimizar a taxa de produção do sistema.

As primeiras quatro características estão diretamente ligadas ao *design* eficiente a nível de custos, enquanto que a quinta e a sexta relacionam-se com o melhoramento da produtividade e fiabilidade do sistema, respetivamente (Koren et al., 2018).

Outro fator importante a ter em conta é a configuração do sistema, que nos indica qual a disposição das máquinas e qual a interligação entre as mesmas, para poder tornar o sistema o mais eficiente possível. É este fator que influencia a performance e as características do sistema. Para a escolha da configuração do sistema tem que se ter em conta e priorizar quatro métricas (Koren et al., 2018):

1. O valor do investimento.
2. A resiliência da capacidade produtiva às avarias das máquinas.
3. A capacidade de resposta à procura do mercado.
4. O nível de consistência da qualidade dos produtos.

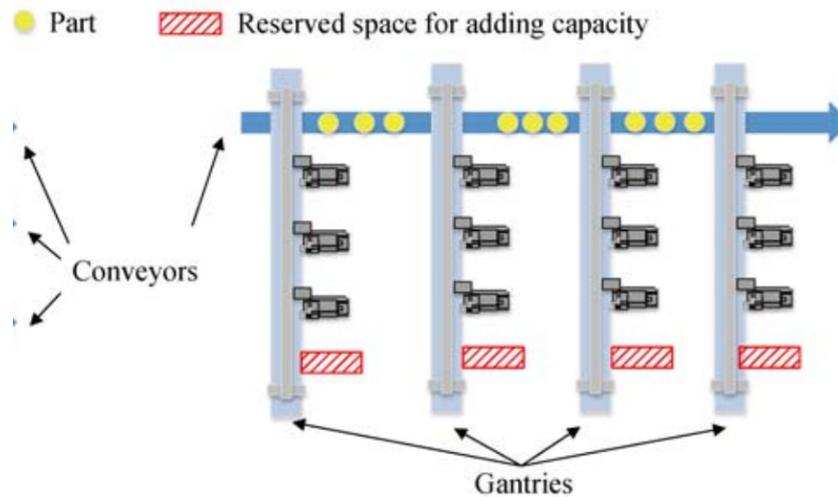


Figura 2.2: Exemplo de configuração de RMS, adaptado de Koren et al. (2018)

Uma das partes integrantes dos RMS são as linhas de montagem. A montagem de um produto pode representar cerca de 25% a 50% dos custos totais de produção (Bi et al., 2007). Por isso, as linhas de montagem de um sistema de produção são um fator importante a ser considerado nesse contexto. Existem vários tipos de sistemas de montagem que podem variar de um sistema totalmente manual até um sistema completamente automatizado. Na figura 2.3 podemos verificar os diferentes tipos de sistemas de montagem e a sua classificação tendo em conta a flexibilidade para as mudanças e o seu nível de automação.

No que diz respeito aos sistemas manuais de montagem estes são bastante capazes de se adaptar às constantes mudanças exigidas pelos mercados, mas têm várias desvantagens: são sistemas com um custo muito elevado e com uma capacidade de produção reduzida, bem como apresentam problemas relacionados com a saúde e segurança dos operadores (Bi et al., 2007). No outro extremo temos os sistemas autónomos dedicados, que apesar de significar uma capacidade de produção bastante elevada e custo reduzido, também têm as suas desvantagens, como são exemplos a baixa flexibilidade e capacidade de produzir algo diferente, bem como a perda de qualidade do produto final e o elevado custo nos sistemas de transporte de materiais (Bi et al., 2007).

Com as flutuações do mercado e com o aumento das exigências dos clientes surgiu a necessidade de formular um sistema que tivesse capacidade de se adaptar rapidamente à mudança e às variações na capacidade produtiva. Assim surgem os Sistemas de Montagem Reconfiguráveis (*Reconfigurable Assembly Systems - RAS*). Este tipo de sistema é bastante promissor no que toca à gestão da mudança e da incerteza em ambientes complexos de produção (ElMaraghy and ElMaraghy, 2016). Dois tipos de indústrias que poderão ter particular interesse

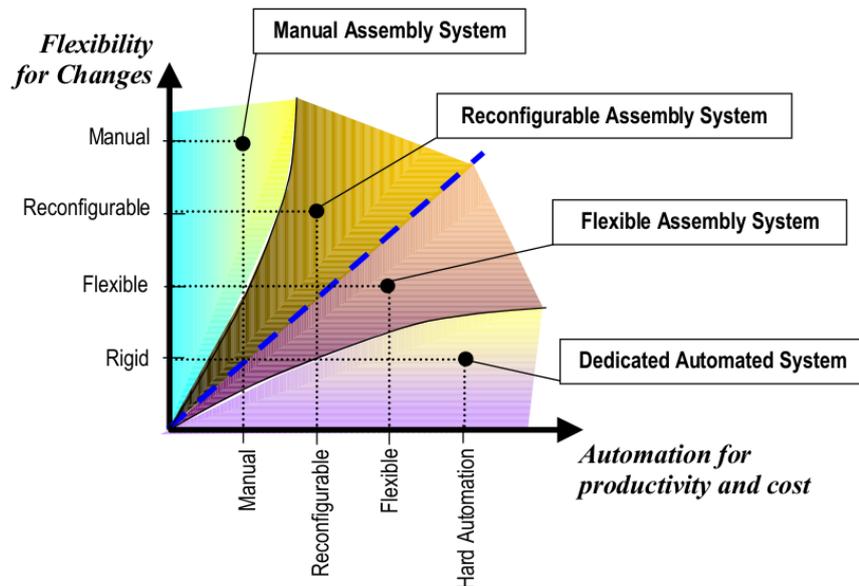


Figura 2.3: Classificação dos sistemas de montagem, adaptado de Bi et al. (2007)

neste tipo de sistema são a automóvel e a aeronáutica, que tem características muito específicas, às quais o RAS é capaz de dar resposta. A indústria automóvel, por exemplo, poderá adaptar-se bem com este tipo de sistema uma vez que, por norma, os produtos pertencentes à mesma família têm grandes variações entre si, mas a mesma linha de montagem é capaz de acomodar as diferentes combinações de montagem (Bi et al., 2007).

Segundo Koren and Shpitalni (2010), os RAS devem possuir as características de customização, convertibilidade e escalabilidade. Tem que ser customizáveis porque necessitam produzir uma família inteira de produtos. Tem de ser convertíveis para serem capazes de mudar rapidamente a montagem entre produtos da mesma família. E tem de ser escaláveis para adaptarem rapidamente a capacidade de produção à procura do mercado.

Existem ainda duas características importantes que deverão ser analisadas aquando a implementação de um RAS. O sistema de transporte das peças deverá ser modular e assíncrono, permitindo o rearranjo rápido do fluxo de produção, adicionando ou saltando pelos diferentes postos de trabalho, conforme as especificidades do produto. Outro fator importante é a configuração do sistema. Importa considerar qual a atribuição de tarefas a cada posto de trabalho por forma a tornar o sistema mais eficiente (Koren and Shpitalni, 2010).

Apesar de os sistemas reconfiguráveis poderem ser uma mais valia para uma organização, é necessário analisar todas as variáveis acima referidas, para que a sua implementação seja bem sucedida. Estas análises devem ser feitas de forma cuidadosa, uma vez que este tipo de sistemas envolvem um grande investimento de capital.

Os RMS têm sido alvo de inúmeros estudos desde o seu aparecimento. Os primeiros

referenciam as suas características e definições como é o caso de Koren et al. (1999). Outros estudos foram feitos no sentido de comparar os vários sistemas de manufatura existentes tendo-se observado que os RMS são os que melhor se adaptam às exigências do futuro (Zhang and Glardon, 2001). Mais recentemente, tem havido estudos mais específicos referentes às várias características da reconfiguração. Autores como Fromherz et al. (2003) procuraram desenvolver modelos computacionais para o design, controlo e avaliação dos RMS. No que diz respeito à reconfiguração do hardware, ou seja, das máquinas envolvidas no processo, existem autores que propuseram modelos matemáticos para escolher configurações de máquinas que aumentassem o nível de reconfigurabilidade do sistema (Hasan et al., 2013). No seguimento destes últimos trabalhos, Wang et al. (2017) desenvolveu um método de avaliação dos esquemas de configuração dos sistemas RMS, tendo por base as características chave dos RMS. Em trabalhos mais recentes, foi ainda desenvolvido um método para melhorar o design dos RMS através de uma abordagem multi-objetivo e com recurso a meta-heurísticas como o *Simulated Annealing*, com o intuito de maximizar a modularidade dos sistema, minimizar o tempo de reconfiguração e minimizar os custos do sistema (Benderbal et al., 2018).

No que diz respeito aos RAS e considerando que a maior parte dos autores entende que estes sistemas são uma parte integrante dos RMS, os estudos têm sido mais numa vertente de aplicação prática. Bi et al. (2007) mostra-nos quais os principais fatores para conseguir atingir a reconfigurabilidade num RAS, referindo o design das linhas de montagem, a modularidade do sistema, a flexibilidade das máquinas de montagem, o design da configuração do sistema, os sistemas de controlo e a interligação destes sistemas com a colaboração dos seres humanos. Existem vários estudos que abordam cada um destes fatores. Heilala and Voho (2001) mostra-nos quais os fatores a ter em conta no design de sistemas que englobam de máquinas totalmente automáticas com postos de trabalho manuais. Autores como Yigit and Allahverdi (2003) definiram o design da configuração de um RAS como um problema de programação não linear inteiro para encontrar o ponto de equilíbrio entre a perda de qualidade devido à modularidade e o custo de reconfiguração para um conjunto de requerimentos exigidos pelo cliente.

O exemplo prático abordado no caso de estudo em análise neste documento, envolve a montagem de dois tipos de motores em uma linha de montagem reconfigurável, onde existe grande variação nas operações a serem realizadas sobre os mesmos, dependendo do tipo. Neste caso em particular, a linha de montagem tem que estar desenhada de forma a suportar os dois tipos de motores, ter em conta as diferentes geometrias e todas as ferramentas envolvidas deverão ser capazes de atuar nos dois tipos de motores para atingir o objetivo

proposto, que é determinar a melhor sequência de motores a fabricar, que minimize o tempo total de produção de todos os motores.

No próximo capítulo será descrito em detalhe o caso de estudo e o problema a analisar neste documento.

3 Descrição do Problema

O sistema analisado no âmbito deste documento consistiu numa secção de uma linha de montagem de motores para automóveis. Nesta linha são produzidos dois tipos de motores: diesel e gasolina. Na figura 3.1 podemos observar o funcionamento da linha de montagem. Inicialmente temos uma lista de motores a ser produzida (D-diesel e G-gasolina). Cada motor passa pela linha de montagem composta por dez postos de trabalho, sendo que cada posto de trabalho apenas pode alojar um motor de cada vez. Após a passagem de um motor pelos dez postos de trabalho considera-se que o motor está concluído.

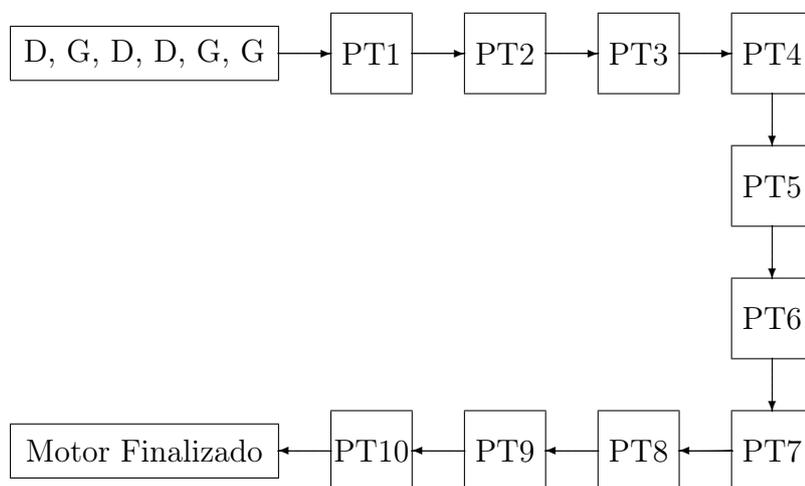


Figura 3.1: Esquemática da linha de montagem

Cada posto de trabalho tem associado uma determinada lista de operações que, dependendo do tipo de motor, poderá variar. Dentro de cada lista de operações podemos ainda distinguir dois tipos, as operações comuns e as operações específicas de cada motor. As operações comuns são sempre executadas em ambos os tipos de motores e poderão ser associadas a operações realizadas por um operador humano que estão devidamente alocados aos postos

de trabalho correspondentes. As operações de transporte entre postos de trabalho e dentro do próprio posto também se encontram englobadas nas operações comuns.

No que diz respeito às operações específicas, estas apenas poderão ser realizadas por robôs móveis que poderão ser chamados diretamente de um centro, que se encontra fora da linha de montagem, e alocados a um determinado posto de trabalho, mas também poderão movimentar-se entre postos de trabalho, dependendo da sua disponibilidade. Não existe também qualquer restrição ao número de robôs que poderá estar em cada posto em simultâneo, pelo que se considera que o mesmo posto de trabalho poderá ter qualquer número de robôs a efetuar trabalho ao mesmo tempo.

Na figura 3.2, podemos observar um exemplo do posto de trabalho desta linha de montagem. Apesar de o robô e o operador humano se encontrarem no mesmo posto de trabalho, estes efetuam as suas operações em zona distintas. O operador humano encontra-se numa bancada própria (Bancada do operador-B.O) a realizar as suas tarefas sobre alguns componentes do motor enquanto, em simultâneo, um ou mais robôs, dependendo das tarefas associadas a esse posto de trabalho e do tipo de motor, irão realizar as suas operações sobre os motores na linha de montagem (L.M).

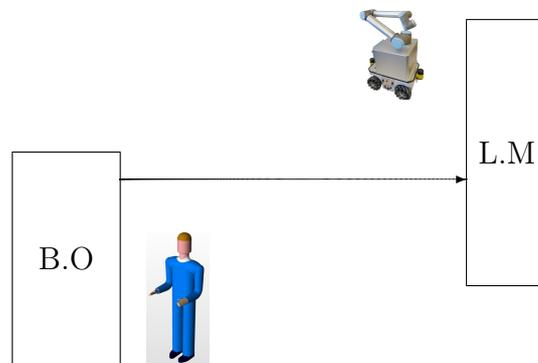


Figura 3.2: Esquemática do posto de trabalho

As operações específicas poderão ser precedidas por outras operações (comuns ou específicas), pelo que deverá ser tido em conta todas as precedências. A figura 3.3 mostra a sequência das operações e as devidas precedências para o primeiro posto de trabalho para o motor a gasolina (3.3a) e para o motor a diesel (3.3b), onde as operações a verde representam as operações comuns e as operações a azul e amarelo representam operações específicas para motores a gasolina e diesel, respetivamente.

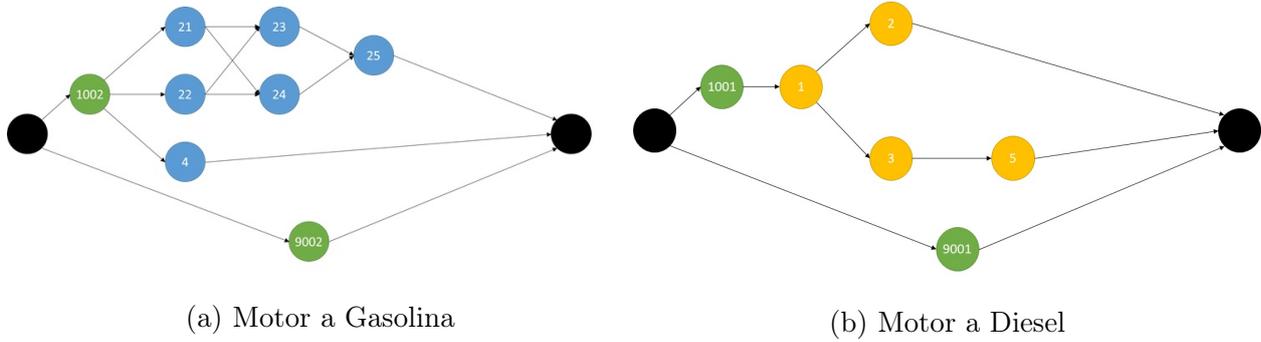


Figura 3.3: Sequência das operações no primeiro posto de trabalho, para os dois tipos de motores

Se tomarmos como exemplo um motor a diesel, vemos que inicialmente o motor irá passar por uma operação de transporte (1001), e só seguidamente irá passar pelas respectivas operações específicas, realizadas exclusivamente por robôs, antes de poder sair do posto de trabalho em direção ao posto seguinte. Quanto à operação 9001, neste caso representa as operações realizadas pelo ser humano ou máquina. Esta operação não afeta de maneira alguma o trabalho efetuado pelos robôs pelo que poderá ser realizada em paralelo. Para a realização das operações específicas, o posto de trabalho poderá chamar mais do que um robô se acontecerem situações semelhantes ao que observamos com as tarefas 2 e 3, que poderão ser executadas em simultâneo. Esta lógica de processamento dos motores ocorre para os restantes postos de trabalho e para os dois tipos de motor.

O resultado pretendido passa por partir de uma lista de motores dos dois tipos e sequenciar os mesmos por forma a reduzir o *makespan*, que representa o tempo que todos os motores demoram a ser processados. Pretende-se, também saber qual a localização de cada robô em cada instante e a operação que este se encontra a realizar. Apesar de os objetivos não referirem as operações comuns, estas terão que ser tidas em conta uma vez que poderão surgir casos em que o tempo de processamento das operações específicas é inferior ao processamento das operações comuns. Se for este o caso, o próximo motor apenas poderá entrar no posto de trabalho após a realização das operações comuns, pois nunca poderemos ter mais que um motor em cada posto de trabalho.

É de referir ainda que na resolução deste problema não foram considerados os tempos de deslocamento dos robôs.

4 Metodologia

A metodologia usada neste documento baseia-se numa combinação de uma meta-heurística com uma heurística, denominada de algoritmo de lista. O funcionamento desta heurística passa por criar um horário com os tempos de processamento de todas as tarefas a realizar, depois seleciona o primeiro elemento dessa lista e aloca-o ao recurso que se encontra disponível, cumprindo uma determinada regra de alocação e assim consecutivamente até não existirem mais tarefas a alocar. Neste caso específico, os recursos são representados pelos robôs e a regra de alocação das tarefas passa por alocar a primeira tarefa ao primeiro recurso disponível e assim consecutivamente até não existir robôs disponíveis, momento em que a lista irá sofrer uma atualização dos tempos. Para a criação do horário com os tempos de processamento tem-se em conta uma determinada lista de motores gerada inicialmente. Com base nessa lista são definidas todas as tarefas e respetivos tempos para o processamento de todos os motores dessa lista.

A meta-heurística utilizada no documento foi a descida estocástica, que é usada com o propósito de minimizar uma determinada função objetivo. Neste caso, passará por receber uma lista de motores numa determinada ordem e fazer permutações de forma aleatória. Irá posteriormente avaliar o resultado dessa permutação na função objetivo. Se a permutação melhora o valor da função objetivo, então a nova lista é guardada, caso contrário mantém a lista original. Importa referir que a função objetivo deste problema será a minimização do *makespan*. Quanto ao número de permutações, este é decidido à priori pelo utilizador do programa.

A figura 4.1 esquematiza a metodologia usada. Inicialmente é gerada uma lista de motores Y . O algoritmo de lista faz a devida alocação das tarefas aos recursos disponíveis, tendo em conta todas as restrições e pressupostos necessários. No problema em questão as restrições prendem-se com as precedências das tarefas, o facto de apenas poder existir um motor em cada estação e cada robô apenas poderá executar uma tarefa de cada vez. Após alocadas todas as tarefas o algoritmo de lista gera uma solução X , que representa a atribuição dos robôs às tarefas e tempo de processamento das mesmas. Através da solução X é obtido o

makespan para a lista Y onde, de seguida, a meta-heurística irá proceder a permutações por forma a melhorar a função objetivo. Como resultado final irá ser apresentada a melhor lista possível, isto é, a sequência de produção de motores que minimiza o *makespan*.

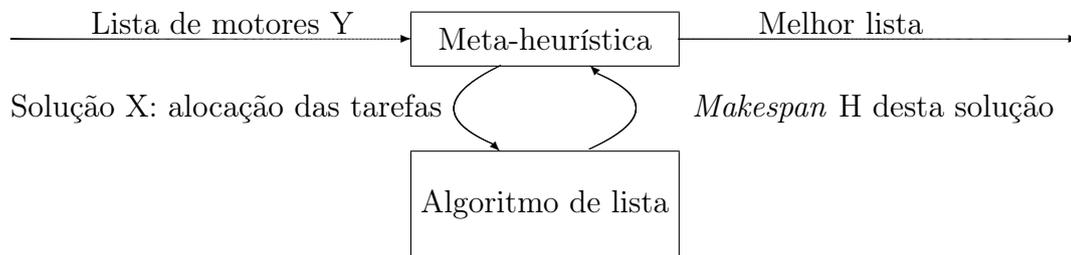


Figura 4.1: Metodologia híbrida utilizada

4.1 Algoritmo de lista proposto

O algoritmo de lista, pela sua simplicidade e capacidade de dar uma solução final é normalmente usado em problemas onde temos n tarefas para realizar numa determinada sequência e que têm que cumprir determinadas restrições, como é o caso do problema em análise (Mokotoff et al., 2001).

Inicialmente é gerada de forma aleatória uma lista com uma sequência de motores a produzir. A quantidade de motores que essa lista contém é definida pelo utilizador. Sobre essa lista é executada uma função que tem como objetivo gerar uma nova lista com a informação da tarefa a realizar, o seu tempo de início, o tempo de término e qual o motor a que corresponde, organizando de seguida esta lista em tempo crescente de início das tarefas. Ao gerar esta lista, a função não tem em consideração nenhuma limitação no que diz respeito ao número de robôs, ou seja, o instante de término de uma tarefa é sempre o instante de início da tarefa seguinte. Na figura 4.2, podemos observar o funcionamento do programa para a geração desta lista inicial.

Uma vez que o pressuposto de um número ilimitado de robôs em termos práticos não é possível nem viável, teve que se considerar um número finito de robôs. Este número é novamente definido pelo utilizador. Assim, o programa já não será capaz de realizar a lista inicial uma vez que poderá haver tarefas prontas a serem iniciadas mas não haver recursos disponíveis para as iniciar. Como tal, a lista inicial terá que ser modificada no decorrer do tempo por forma a atualizar os tempos iniciais das tarefas a alocar. Para o efeito, esta

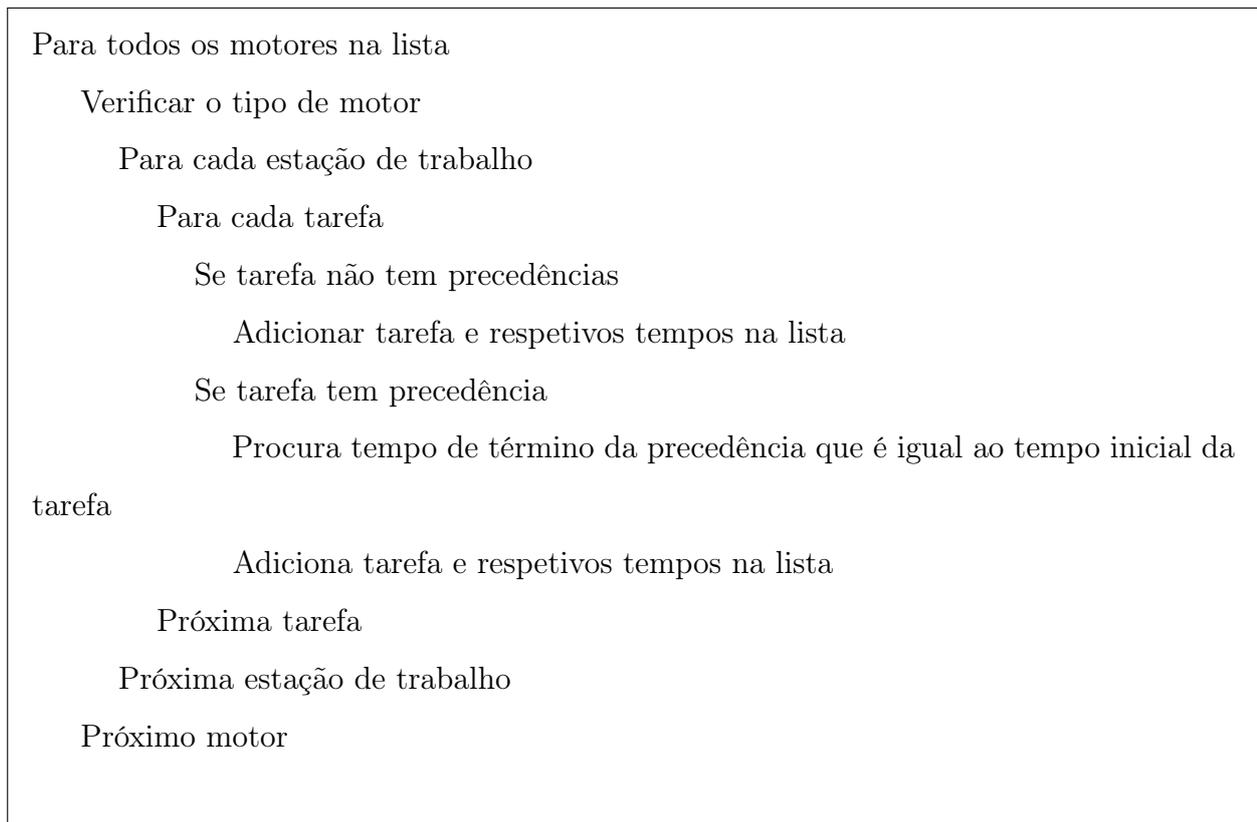


Figura 4.2: Pseudo-código da função de geração da lista inicial

lista passará por uma nova função que recebe a lista das tarefas ainda não alocadas e o menor tempo em que o próximo robô estará disponível para efetuar a tarefa. Tendo por base o instante de disponibilidade do robô, a lista sofrerá novamente alterações pelo mesmo processo demonstrado na figura 4.2.

Na figura 4.3, encontra-se apresentado o funcionamento do algoritmo de lista. Tendo em conta as duas funções explicadas anteriormente podemos entender melhor o funcionamento do algoritmo. Inicialmente o algoritmo recebe a lista inicial, ou seja, a lista ótima como argumento e vai fazer a alocação das tarefas aos robôs disponíveis. Cada vez que uma tarefa é alocada a um robô, este fica com o registo da tarefa bem como o tempo inicial e o tempo em que voltará a estar disponível para alocar uma nova tarefa (tempo final da tarefa). Se ocorrer uma situação em que não haja mais robôs disponíveis, então será chamada a função para atualizar a lista, sendo que o início da próxima tarefa a realizar será o menor tempo de término de todos os robôs. Este ciclo irá correr até não existirem mais tarefas a serem alocadas, produzindo no fim como resultado o *makespan* para aquela sequência de motores.

Com base neste resultado e dependendo do número de permutações que o utilizador pretender executar, a meta-heurística irá receber o valor do *makespan* de cada permutação

e compara-o com o anterior. Se o valor for menor, a sequência dos motores associado a esse *makespan* é melhor do que o anterior. De seguida o algoritmo guarda esse valor e repete o processo consecutivamente até realizar todas as permutação na lista dos motores que o utilizador requereu.

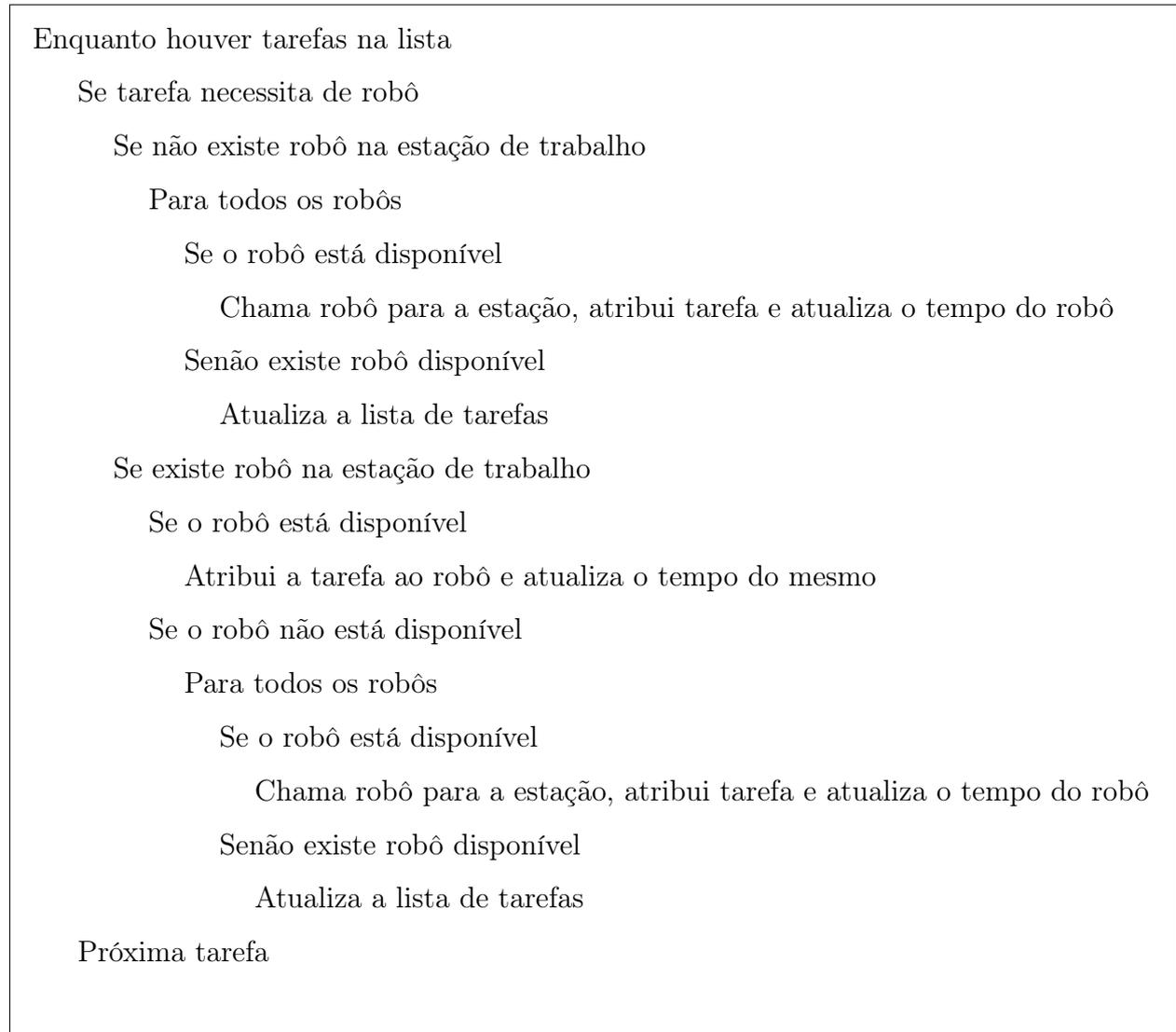


Figura 4.3: Algoritmo de Lista

As permutações que ocorrem na lista original dos motores são geradas de forma aleatória, podendo o resultado não ser o ótimo, uma vez que não é garantido que são testadas todas as permutações possíveis. Este método híbrido permite-nos encontrar sempre o mínimo *makespan* das permutações testadas. O facto de não correr todas as permutações possíveis prende-se com o tempo computacional que isso iria exigir.

5 Resultados

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo apenas têm em consideração os três primeiros postos de trabalho dos dez que perfazem a totalidade da linha de montagem. Recorreu-se a esta simplificação para diminuir o tempo de processamento computacional. Esta simplificação em nada afeta o propósito desta análise uma vez que estes resultados poderão ser facilmente extrapolados para a totalidade dos dez postos de trabalho.

Uma primeira análise foi efetuada não tendo em conta listas mistas, isto é, apenas foram introduzidas listas com o mesmo tipo de motor (só diesel ou só gasolina), fazendo apenas variar o número de robôs disponíveis no sistema. A tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos para uma lista de cinco motores para diferentes quantidades de robôs. O *makespan* mínimo representado na última coluna diz respeito ao valor mínimo possível para fabricar os cinco motores, não tendo qualquer restrição relativamente ao número de robôs disponíveis. Este valor é determinado pela soma dos tempos das tarefas comuns realizadas por operadores humanos, cujos tempos são fixos, e determinam o *takt time*, que é o tempo máximo que cada motor pode permanecer em cada posto de trabalho. Este valor é igual para todas as listas pois para os primeiros três postos de trabalho dos dois tipos de motor a soma dos *takt time* dos postos é igual.

Outro valor apresentado na tabela é a taxa de ocupação dos robôs, ou seja, a percentagem de tempo em que estes se encontram realmente a realizar trabalho. No caso de apenas termos um robô disponível para a realização dos motores, o *makespan*, quer nos motores diesel quer nos motores a gasolina, ultrapassa claramente o valor mínimo, mas, apesar disso, a sua taxa de ocupação não é máxima. Este caso prende-se com a questão das precedências de certas tarefas bem como a restrição que apenas permite um motor em cada posto de trabalho. A título de exemplo, podemos considerar um motor que entre no primeiro posto de trabalho onde o robô consegue realizar as suas tarefas antes de o operador humano ter terminado. Uma vez que o próximo motor apenas poderá entrar após a conclusão por parte do operador

Tabela 5.1: Resultados para listas de um tipo de motor

Lista de mot.	Nr. robôs	Taxa ocup. robôs(%)	<i>Makespan</i>	<i>Makespan min.</i>
	1	77,4	279	
[D,D,D,D,D]	2	1-52,4; 2-49	213	213
	3	1-49; 2-38,9; 3-13,5	213	
	1	71,7	297	
[G,G,G,G,G]	2	1-42,7; 2-52	225	213
	3	1-28,2; 2-33,8; 3-38	213	

humano, o robô irá estar parado durante essa diferença do tempo.

Observado em atenção a tabela 5.1 podemos concluir que, para a lista de motores a diesel, dois robôs são a quantidade necessária para cumprir o tempo mínimo, mas isso traduz-se numa taxa de ocupação, de praticamente, metade do tempo total de montagem dos motores, o que dependendo dos vários fatores, como por exemplo o custo de aquisição e manutenção dos robôs, poderá tornar inviável a utilização de dois robôs. Ao aumentar o número de robôs para três no motor a diesel vemos que o o *makespan* não diminui dos 213, isto prende-se com o facto de as tarefas humanas representarem o tempo mínimo que o motor tem que estar na linha. Para o caso dos motores a gasolina, vemos que só será possível atingir o *makespan* mínimo com a aquisição de três robôs o que mais uma vez obriga a taxas de ocupação muito diminuídas.

Nesta primeira análise, e uma vez que todos os motores apresentados eram do mesmo tipo, a hibridação explicada anteriormente não foi aplicada já que qualquer que fosse a troca efetuada na lista o resultado iria ser sempre o mesmo. Na tabela 5.2 apresentada em baixo é demonstrado a aplicação e os correspondentes resultados da meta-heurística onde inicialmente se testaram duas listas, uma com 60% de motores do tipo diesel e 40% de motores gasolina e outra com o inverso. Quanto ao número de permutações, foram definidas 50 trocas para as duas listas e para os diferentes números de robôs. Com este número de motores e de permutações a meta-heurística deverá apresentar resultados muito próximos do ótimo.

Ao analisar a tabela verificamos que além do número de robôs, a alteração da ordem de produção dos motores tem uma grande influência sobre o valor do *makespan*. Se tivermos em consideração a primeira lista, podemos verificar que existe uma diminuição no valor do

makespan de cerca de 15% quer quando passamos de um robô para dois robôs e mantemos a mesma lista , quer quando alteramos a ordem de produção dos motores mantendo o número de robôs. Outra conclusão que pode ser retirada pelos dados da tabela é que a partir de um certo número de robôs as alterações na lista não iram ter uma grande influência, mas como já foi referido anteriormente esta decisão implica uma baixa taxa de ocupação que poderá representar um custo não suportável para o sistema de produção.

Tabela 5.2: Resultados da aplicação da meta-heurística

L. inicial	Nr. robôs	T.O(%)	Makespan	Melhor L.	Makespan	T.O(%)
[D,D,D,G,G]	1	70,9	303	[D,G,G,D,D]	271,2	79,2
	2	1-45,1	256,8	[G,G,D,D,D]	217,8	1-50,1
		2-38,6				2-50,7
	3	1-40,6	219	[G,G,D,D,D]	213	1-40,6
		2-35,1				2-38,3
		3-24,7				3-22
[G,G,G,D,D]	1	81	264,6	[G,G,G,D,D]	264,6	81
	2	1-49	220,2	[G,G,G,D,D]	220,2	1-49
		2-48,3				2-48,3
	3	1-36,6	213	[G,G,G,D,D]	213	1-36,6
		2-45,4				2-45,4
		3-26,2	3-26,2			

Nas figuras 5.1, 5.2, e 5.3 são apresentados os diagramas que representam as movimentações de um, dois e três robôs respetivamente, entre os diferentes postos de trabalho para o caso da lista de produção [D,D,D,G,G]. As sub-figuras (a) representam essa movimentação para a lista inicial enquanto que as sub-figuras (b) representam os movimentos para a melhor lista, ou seja, após a utilização da meta-heurística.

Ao analisar as imagens e com os dados fornecidos pelo programa, é interessante observar que após a aplicação do método híbrido, e que para além da diminuição do *makespan* e do aumento da taxa de ocupação dos robôs ocorre igualmente uma diminuição no número dos movimentos dos robôs entre as listas iniciais e as melhores listas, para qualquer uma das três situações. No caso da utilização de um robô (figura 5.1) existe uma diminuição de 12 para 10, para dois robôs (figura 5.2) de 16 para 13 e no último caso (figura 5.3) de 18 para

12. Este dado indica-nos que a ordem de execução dos motores também influencia o número de movimentações que o robô terá que efetuar. Isto poderá tornar-se relevante aquando da introdução de novas restrições referentes ao tempo de deslocamento dos robôs entre estações, pois quanto menor for o número de deslocações menor será também o tempo perdido pelos robôs entre deslocações aumentando, conseqüentemente, a sua taxa de ocupação.

A observação deste tipo de diagramas poderá ter maior importância quando forem adicionados os dez postos de trabalho uma vez que se verificarmos que um determinado robô se desloca constantemente entre um posto de trabalho inicial e o último posto, facilmente percebemos que grande parte do tempo desse robô será provavelmente gasto entre as transições entre postos. Com a análise destes diagramas poderemos perceber qual a melhor configuração dos postos de trabalho por forma a evitar essas situações, bem como restringir os movimentos dos robôs para minimizar o seu tempo de deslocamento.

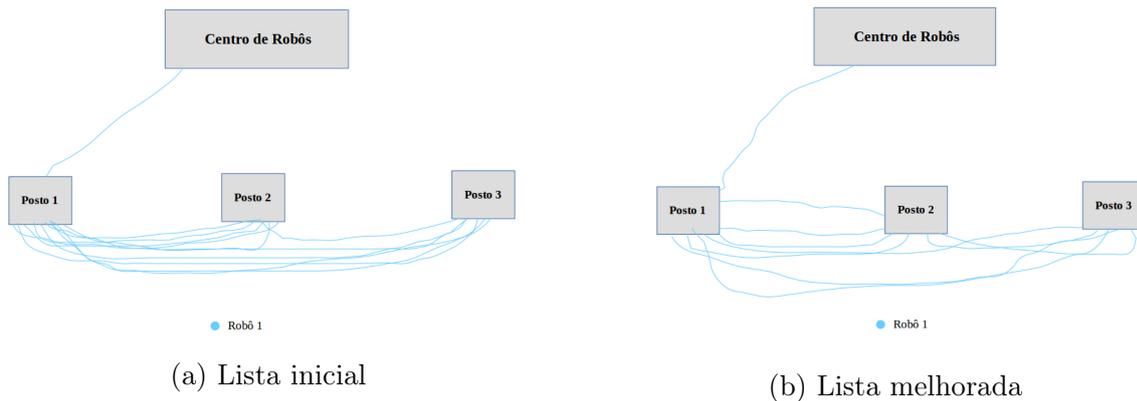


Figura 5.1: Diagrama de movimentação para um robô para lista [D,D,D,G,G]

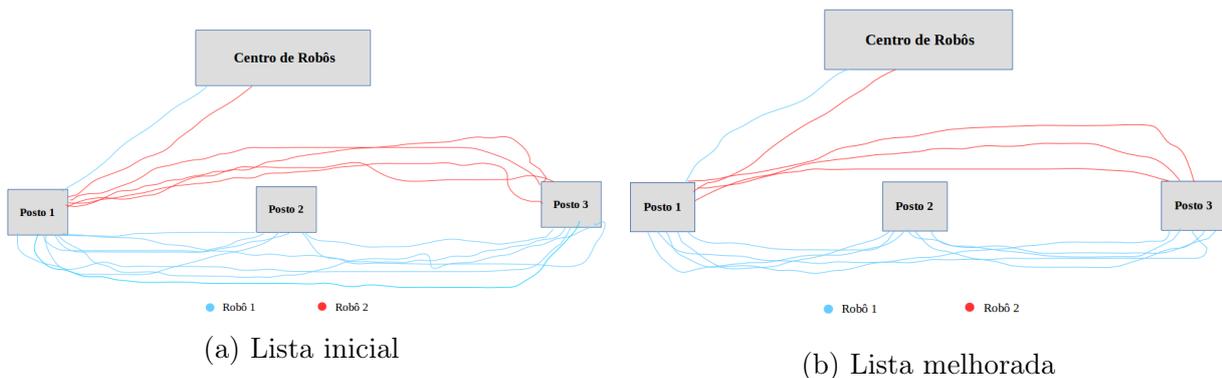


Figura 5.2: Diagrama de movimentação para dois robôs para lista [D, D, D, G, G]

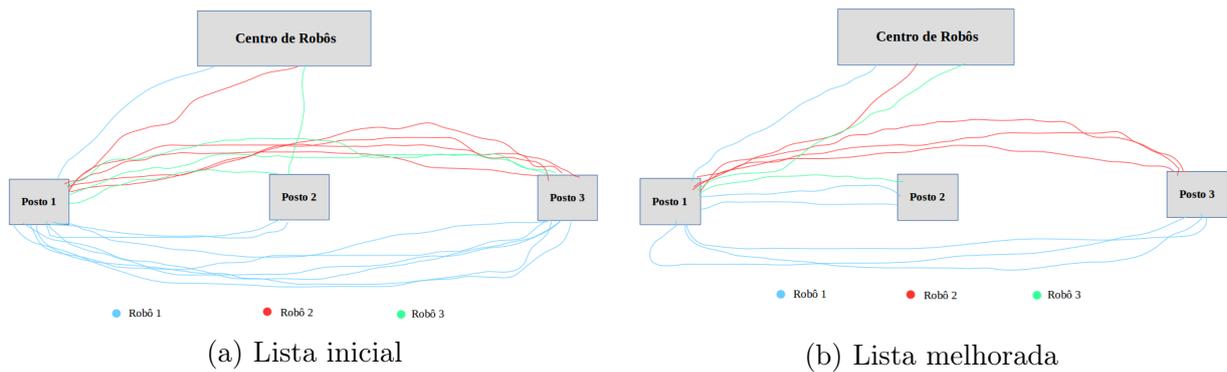


Figura 5.3: Diagrama de movimentação para três robôs para lista [D, D, D, G, G]

Na tabela 5.3 está representado a informação fornecida pelo algoritmo de lista. Através desta tabela é mais fácil perceber as movimentações quer dos robôs quer dos motores e em que tempos elas ocorrem. Podemos observar todas as situações explicadas anteriormente neste documento e vemos, por exemplo, que na transição de motores entre postos (de tarefa 25 para tarefa 8001) existe uma diferença entre os tempos de fim e de início. Isto prende-se com o facto de o operador humano só terminar a sua tarefa (9002) após o robô e é nestas situações que ocorrem os tempos "mortos" dos mesmos. Outro dado que é possível obter através da utilização da metodologia é o número de robôs que se encontram em simultâneo num dado posto de trabalho. Não havendo limitação relativamente a este valor, facilmente se percebe que o número de robôs presente em cada posto em simultâneo será igual ao número máximo de tarefas específicas em paralelo que aí existam.

Tabela 5.3: Apresentação dos resultados do algoritmo de lista

Tarefa	Tipo tarefa	Tempo Inicial	Tempo Final	Posto	Nr. Motor
1002	Manual	0	4,8	1	1
9002	Manual	0	30,6	1	1
4	Robô 1	4,8	9,6	1	1
21	Robô 2	4,8	12	1	1
22	Robô 3	4,8	12	1	1
23	Robô 1	12	19,2	1	1
24	Robô 2	12	19,2	1	1
25	Robô 3	19,2	28,2	1	1
8001	Manual	30,6	60,6	2	1
1002	Manual	30,6	35,4	1	2

6 Conclusão

O trabalho apresentado nesta dissertação tinha como principal objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de fornecer alguns dados que poderão vir a ser úteis aquando da tomada de decisão no que diz respeito ao sistema de produção mencionado ao longo do trabalho. Os objetivos propostos neste trabalho passaram por perceber qual o efeito que as permutações numa lista inicial de motores a produzir teriam no *makespan* do sistema, o número de robôs a usar para tentar aumentar o sua taxa de ocupação sem por em causa o tempo de produção dos motores, bem como as movimentações dos mesmos ao longo do processo. Com a aplicação do método híbrido apresentado neste documento foi-se capaz de responder aos objetivos propostos, sendo que com esta ferramenta os agentes de tomada de decisão poderão analisar os dados apresentados e decidir qual a melhor ação a tomar consoante as variáveis do sistema.

Apesar desta análise ter cumprido os objetivos a que se propôs poderão ser ainda analisadas outras situações futuramente. Um dos aspetos que poderá ser alvo de trabalho futuro é a adição de restrições ao problema, mais concretamente adição dos tempos de deslocamento dos robôs entre os postos de trabalho, de maneira a tentar aproximar o problema à situação real. Também poderá ser desenvolvido um modelo capaz de otimizar a relação entre o número de robôs e o valor do *makespan*. Para tal seria interessante ter os dados relativos aos custos associados aos robôs. Seria também importante perceber de que forma as trocas de tarefas dentro do mesmo posto de trabalho afetariam o *makespan* final. Para estas trocas teria que ser sempre tido em consideração as precedências das mesmas.

Por fim seria também importante adaptar este modelo a outra meta-heurística. A escolha da meta-heurística usada no documento prende-se com o facto de ser simples e produzir resultados satisfatórios bem como pelo facto de, dentro do grupo de investigação, já ter sido usada em problemas que procuravam responder de forma semelhante ao que aqui se apresenta, apesar disso não é de todo a meta-heurística mais eficiente. Isto deve-se ao facto de não poderemos controlar as trocas efetuadas podendo assim o modelo repetir a mesma troca mais do que uma vez. Se considerarmos um problema com um elevado número de

motores e com a totalidade dos dez postos de trabalho, poderemos estar a perder muito tempo no processamento de trocas já realizadas, sem que no fim nos seja garantido um resultado próximo do ótimo.

7 Referências Bibliográficas

- Benderbal, H. H., M. Dahane, and L. Benyoucef (2018). Modularity assessment in reconfigurable manufacturing system (rms) design: an archived multi-objective simulated annealing-based approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94(1-4), 729–749.
- Bi, Z., L. Wang, and S. Y. Lang (2007). Current status of reconfigurable assembly systems. *International Journal of Manufacturing Research* 2(3), 303–328.
- ElMaraghy, H. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International journal of flexible manufacturing systems* 17(4), 261–276.
- ElMaraghy, H. and W. ElMaraghy (2016). Smart adaptable assembly systems. *Procedia CIRP* 44, 4–13.
- Fromherz, M. P., D. G. Bobrow, and J. De Kleer (2003). Model-based computing for design and control of reconfigurable systems. *AI magazine* 24(4), 120.
- Hasan, F., P. Jain, and D. Kumar (2013). Machine reconfigurability models using multi-attribute utility theory and power function approximation. *Procedia Engineering* 64, 1354–1363.
- Heilala, J. and P. Voho (2001). Modular reconfigurable flexible final assembly systems. *Assembly Automation* 21(1), 20–30.
- Koren, Y., X. Gu, and W. Guo (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*.
- Koren, Y., U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, and H. Van Brussel (1999). Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP annals* 48(2), 527–540.
- Koren, Y. and M. Shpitalni (2010). Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of manufacturing systems* 29(4), 130–141.

- Lambert, D. and S. F. Slater (1999). Perspective: First, fast, and on time: The path to success. or is it? *Journal of Product Innovation Management* 16(5), 427–438.
- Mehrabi, M. G., G. A. Ulsoy, and Y. Koren (2000). Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing. *Journal of Intelligent manufacturing* 11(4), 403–419.
- Mokotoff, E., J. L. Jimeno, and A. I. Gutiérrez (2001). List scheduling algorithms to minimize the makespan on identical parallel machines. *Top* 9(2), 243–269.
- Renzi, C., F. Leali, M. Cavazzuti, and A. Andrisano (2014). A review on artificial intelligence applications to the optimal design of dedicated and reconfigurable manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 72(1-4), 403–418.
- Wang, G. X., S. H. Huang, Y. Yan, and J. J. Du (2017). Reconfiguration schemes evaluation based on preference ranking of key characteristics of reconfigurable manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89(5-8), 2231–2249.
- Yigit, A. S. and A. Allahverdi (2003). Optimal selection of module instances for modular products in reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 41(17), 4063–4074.
- Zhang, G. and R. Glardon (2001). An analytical comparison on cost and performance among dms, ams, fms, and rms. 1st conf. on agile reconfigurable manufacturing 21.–22. *May Ann Arbor, MI, USA*.