



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA



1.

Vanessa Filipa Marques Sousa

**EXTENDING THE RESOURCE TASK NETWORK  
FRAMEWORK FOR PLANNING ROBOTS IN  
ASSEMBLY LINES**

Dissertação no âmbito do mestrado integrado em Engenharia Mecânica na  
Especialidade de Produção e Projeto orientada pelos Professores Doutores Samuel  
Moniz, Pedro Neto e apresentada á dissertação de Mestrado no Departamento de  
Engenharia Mecânica

Julho de 2019

---

Extensão do modelo Resource Task Network para planeamento de robôs em linhas de montagem

---

## **Extensão do modelo Resource Task Network para planeamento de robôs em linhas de montagem**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

### **Extending the Resource Task Network framework for planning robots in assembly lines**

Autor

**Vanessa Filipa Marques Sousa**

Orientador[es]

**Samuel de Oliveira Moniz**

**Pedro Mariano Simões Neto**

Júri

Presidente **Professor Doutor Cristóvão Silva**  
**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

Orientador **Professor Doutor Samuel Moniz**  
**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

Vogais **Professor Doutor Miguel Vieira**  
**Investigador do instituto Superior Técnico**



With your mind power, your determination, your instinct, and the  
experience as well, you can fly very high.  
Ayrton Senna

Aos meus pais e avós que me deram a oportunidade de tornar este  
sonho realidade.



## Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar não posso deixar de agradecer aos meus pais Rui Sousa e Cristina Sousa pelos princípios que me transmitiram, pela amizade e pelo apoio, esforço e disponibilidade imensurável em investir no meu futuro. A eles fica nesta dissertação o meu enorme agradecimento que é extensível aos meus avós que desde cedo foram também pedras basilares no meu crescimento intelectual e humano.

O estudo, que agora se redige, conta também com o contributo do Prof. Dr. Samuel Moniz e do Prof. Dr. Pedro Neto, meus orientadores, que sempre se mostraram disponíveis para partilhar o seu conhecimento e amizade durante este período letivo.

Por fim, mas, seguramente não menos importante, agradeço a todos os meus colegas, em particular, ao Luís Veloso, Ana Margarida, César Lopes, Bárbara Curralo e Cátia Carvalheiro que mais do que parceiros, nesta jornada que agora finda, foram acima de tudo companheiros em todas as circunstâncias, deixo uma especial gratidão.





## RESUMO

Para atingir níveis superiores de eficiência, o conceito indústria 4.0 pretende criar sistemas mais eficientes e flexíveis. Na indústria da manufatura existe cada vez mais pressão para projetar novas linhas de montagem que incluam a utilização de robôs colaborativos e móveis.

O objetivo deste estudo é desenvolver um modelo de otimização que utiliza programação linear mista (MILP) para o escalonamento ótimo de robôs colaborativos em linhas de montagem. Através disso, investigar se uma determinada empresa de manufatura pode beneficiar com a diminuição do número de robôs na linha de produção, e enquanto isso tornar os robôs mais eficientes, mais colaborativos com humanos e reduzir tempos não produzidos entre tarefas.

Utilizando a formulação Resource Task Network (RTN) este estudo analisa se a utilização de apenas um robô dedicado a duas estações de trabalho pode ser viável e em que cenários pode ser apresentado como uma desvantagem.

Nesta dissertação são ainda apresentadas modificações ao modelo RTN convencional para descobrir graus de liberdade adicionais e assim conseguir modelar o planeamento das linhas de montagem em maior detalhe.

**Palavras – chave** Linhas de montagem, robótica colaborativa, Resource Task Network, Programação linear mista

Comentado [SM1]: Remover referencia por ter alguns anos



**ABSTRACT**

To achieve superior levels of efficiency Industry 4.0 concept intends to create more efficient and flexible manufacturing systems and also reduce costs. The manufacturing industry is increasing the pressure to design novel assembly lines that includes the utilization of collaborative and mobile robots.

The purpose of this study is to develop a mixed linear programming (MILP) optimization approach for the optimal scheduling of collaborative robots in assembly production lines. Through this, investigate if a given manufacturing company can benefit with the decrease on the number of robots in the production line; while making the robots more efficient, more collaborative with humans and reducing time loss between tasks.

Using the resource task network method – based on continuous formulation framework, this study analyses if using only one robot dedicated to two workstations can be viable, and in what scenarios it can be presented as a disadvantage. In this study, is presented modifications to the conventional RTN model to discover additional degrees of freedom and is these extensions modeling complete assembly lines in detail.

**Keywords** Assembly lines, Collaborative Robotics, Resource task network, Mixed Integer Linear Programming.

**Comentado [SM2]:** Rever abstract de acordo com os comentários anteriores

**Formatou:** Inglês (Reino Unido)



## ÍNDICE

Comentado [SM3]: Corrigir índice

ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABELAS .....	xi
SIMBOLOGIA E SIGLAS.....	13
Siglas .....	13
1. Introdução.....	15
1.1. Relevância do trabalho .....	15
1.2. Enquadramento .....	16
1.2.1. Planeamento e escalonamento .....	16
1.2.2. Linhas reconfiguráveis .....	17
1.2.3. Métodos de otimização .....	18
1.3. Objetivos da dissertação .....	19
1.4. Estrutura da dissertação .....	20
2. Enquadramento teórico.....	21
2.1. Planeamento e escalonamento .....	21
2.2. Linhas de montagem reconfiguráveis .....	23
2.3. Robótica colaborativa .....	24
2.4. Otimização do planeamento e escalonamento .....	25
2.5. Resource Task Network.....	26
3. Abordagem metodológica.....	28
3.1. Descrição do problema .....	28
3.2. Modelo base RTN (formulação discreta).....	29
3.3. Modelo de otimização proposto.....	29
3.3.1. Formulação matemática.....	29
3.3.2. Implementação do modelo e software .....	33
3.3.3. Dados de entrada e saída .....	33
4. Caso de estudo .....	35
4.1. 1ª instância .....	36
4.2. 2ª instância .....	37
4.3. 3ª instância .....	37
4.4. Resumo .....	40
5. Análise de resultados .....	41
5.1. Validação do modelo .....	41
5.2. Discussão de resultados .....	45
5.3. Linha de montagem com dois robôs Vs linha de montagem com um robô partilhado .....	45
5.4. Robô sem setup VS robô com setup .....	47
5.5. Sumario dos resultados obtidos .....	48
5.6. Taxa de utilização dos equipamentos .....	48

6. CONCLUSÕES.....	51
6.1. Trabalhos futuros.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Posto de trabalho colaborativo (Krüger, Lien, and Verl 2009).....	24
Figura 2.2. Metodologia conceptual para a obtenção de solução (Moniz et al. 2014).....	25
Figura 2.3. Representação RTN: Produção do produto A.....	27
Figura 3.1. Representação esquemática do horizonte temporal .....	31
Figura 4.1. Representação esquemática do layout da linha de produção. ....	35
Figura 4.2. Representação detalhada da tarefa 1 .....	35
Figura 4.3. Representação RTN da 1ª instância. ....	36
Figura 4.4. Representação RTN das tarefas colaborativas. ....	36
Figura 4.5. Representação RTN da instância 2 .....	37
Figura 4.6. Representação RTN da instância 2 .....	37
Figura 4.7. Representação RTN da instância 3 .....	39
Figura 4.8. Representação RTN das tarefas colaborativas .....	39
Figura 4.9. Representação RTN das tarefas de setup .....	39
Figura 5.1. Representação da tarefa 1.....	41
Figura 5.2. Representação da tarefa colaborativa do robô .....	42
Figura 5.3. Gráfico da taxa de produção .....	42
Figura 5.4. Escalonamento da linha de montagem.....	42
Figura 5.5. escalonamento para a instância 1 .....	45
Figura 5.6. taxa de produção da instância 2 .....	46
Figura 5.7. escalonamento para a instância 2 .....	46
Figura 5.8. taxa de produção da instância 2 .....	46
Figura 5.9. escalonamento para a instância 3 .....	47
Figura 5.10. Taxa de produção da instância 3 .....	47
Figura 5.11. Taxa de utilização dos recursos humanos .....	49
Figura 5.12. Taxa de utilização dos recursos robóticos. ....	49





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Elementos da formulação - índices.....	29
Tabela 3.2. Elementos da formulação - Sets .....	30
Tabela 3.3. Elementos da formulação – Variáveis .....	30
Tabela 3.4. Elementos da formulação – Parâmetros .....	30
Tabela 4.1. Distância em metros percorrida pelo robô entre WC .....	38
Tabela 4.2. Tempo em segundos que o robô demora a deslocar-se para entre WC. ....	38
Tabela 4.3. Resumo das características das instâncias criadas.....	40
Tabela 5.1. Resumo dos resultados obtidos (N=NÃO; S=SIM) .....	48



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Siglas

AGV – Autonomous Guide Vehicle  
COLBOTS – Collaborative Robots  
CT – Cycle Time  
FO – Função Objetivo  
HRC – Human Robot collaboration  
IDE – Integrated Development environment  
LP – Linear Programming  
MILP – Mixed Integer Linear Programming  
MIQCP – Mixed Integer Quadratically Constrained Programming  
MIQP – Mixed Integer Quadratically Programming  
OPL – Optimization Programming Language  
QCP – Quadratically Constrained Programming  
QP – Quadratically Programming  
RLP – Reconfigurable Layout Problem  
RTN – Resource Task Network  
STN – State Task Network  
WIP – Work in Progress  
WC – Work Centre



## 1. Introdução

Devido á solicitação por parte dos clientes de produtos mais customizados, surge a necessidade de linhas de produção cada vez mais eficientes e flexíveis, a redução de custos e o aumento da responsividade são requisitos de carácter indispensável. Uma das formas de conseguir uma redução de custos e consequentemente um aumento do volume de produção é com o melhoramento da utilização dos recursos disponíveis.

Nas últimas décadas, várias abordagens ao conceito de otimização foram propostas, de forma a conseguir lidar com problemas de planeamento e escalonamento. Com isto pretende-se atingir maiores níveis de eficiência e utilização dos recursos disponíveis. Uma vez que serão usados robôs como recursos e tendo em vista a evolução que tem surgido nesse ramo, serão considerados robôs colaborativos (COLBOTS). (Makrini et al. 2017)(Nikolakis et al. 2018)

Comentado [SM4]: Colocar citações

### 1.1. Relevância do trabalho

Com a margem de erro cada vez mais pequena associada a falta de qualidade dos produtos, produção excessiva tendo em vista a procura do mercado, surge a necessidade de desenvolver metodologias e ferramentas que facilitem o aprimoramento das linhas de montagem. O facto de existirem cada vez mais estudos sobre a forma como o trabalho repetitivo pode prejudicar a saúde do ser Humano (Realyvásquez-Vargas et al. 2019) leva a que o trabalho desenvolvido nesta dissertação seja de extrema importância nesta área de investigação.

As áreas de planeamento e escalonamento são de extrema importância para conseguir melhorar sistema. (Hopp and Spearman 1996) No entanto, a implementação desses modelos teóricos a casos de estudo reais é cada vez mais escassa. Surge então a necessidade de desenvolver este estudo, o qual se sustentará no melhoramento de um modelo de

Comentado [SM5]: •Introduzir referências bibliográficas que contextualizem o problema  
•Colocar referências com a quantificação do problema. Por exemplo dimensão do sector, crescimento esperado, etc  
• Rever texto para evitar informalismos e inconsistências, p.e. "Com uma margem de erro cada vez mais pequena"... Erro de que?

Comentado [SM6]: Colocar referência e desenvolver este argumento

escalonamento e planeamento já existente que permita a gestão de recursos robóticos no chão de fábrica.

O propósito deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo de otimização que permita gerir e agendar a intervenção dos recursos robóticos nos postos de trabalho aumentando a sua utilização, desta forma, tornar a linha de produção mais eficiente.

Este estudo é importante uma vez que as empresas cada vez mais se preocupam com a redução de custos e rentabilizar os recursos que tem disponíveis. Com este trabalho será possível saber se é mais vantajoso ter um robô em cada posto de trabalho ou tentar rentabilizar esse recurso alocando-o a outro ou outros postos de trabalho.

## 1.2. Enquadramento

### 1.1.1.1.2.1. Planeamento e escalonamento

O planeamento tem uma perspetiva mais abrangente que o escalonamento, uma vez que tem um horizonte temporal mais amplo (6 meses a 1 ano) e por isso menos detalhe..(Roldão and Ribeiro 2014)

Com esta ferramenta é possível criar um conjunto de planos integrados, o plano da produção, onde é especificado quantidades a produzir ou a subcontratar, ou planos de manutenção preventiva ou condicionada onde se especifica que componente substituir, passos a seguir, material e recursos necessários, etc.).

Desta forma é possível cumprir a procura prevista ou encomendas dos clientes. (Kempf, Keskinocak, and Uzsoy 2011) e permitir fazer frente a possíveis alterações na procura e desta forma melhorar indicadores produtivos (Roldão and Ribeiro 2014).

O termo *scheduling* ou escalonamento parte desde o início do século XX, mas a análise deste género de problemas apenas foram possíveis entre os anos 50 e 60 com o avanço dos computadores (Hopp and Spearman 1996).

Em todas as vertentes da manufatura, o principal foco incide em minimizar o Work In Progress (WIP), cumprir de prazos de entrega, curtos tempos de espera para os clientes e maximizar a utilização dos recursos. No entanto, atender a todos estes objetivos é impossível, uma vez que estes entram tendencialmente em conflito entre si, por isso, com o

**Formatada:** Título 2, Esquerda, Avanço: Esquerda: 3 cm, Primeira linha: 0 cm, Espaçamento entre linhas: simples

**Comentado [SM7]:** As citações estão muito repetidas, é necessário encontrar referências alternativas

**Comentado [vs8R7]:**

**Comentado [SM9]:** Termos em inglês devem aparecer em itálico

**Comentado [SM10]:** Falta citação

escalonamento da produção otimizado é possível obter equilíbrio entre estes (Hopp and Spearman 1996). Uma forma de medir a utilização dos recursos é através do makespan, este indica o tempo que um conjunto de tarefas demoram a ser executadas. Neste estudo o tempo disponível para a realização das tarefas consideradas será sempre o mesmo, sendo por isso avaliada através da razão entre o tempo útil, tempo em que estão ocupados, e o tempo total.

Será também avaliado o tempo de ciclo através da Lei de Little (ver [equação 1.1](#)) é possível obter a relação entre o WIP e o tempo de ciclo (*cycle time*) (CT). Esta enuncia que o WIP é igual ao produto do tempo de ciclo com a taxa de produção (*throughput*) (Kempf, Keskinocak, and Uzsoy 2011). O *throughput* pode ser definido como a quantidade que é produzida num determinado processo, máquina, posto de trabalho ou linha de produção, por unidade de tempo (Hopp and Spearman 1996)

$$WIP = CT * TH \quad (1.1)$$

Uma forma de suavizar o trabalho de escalonamento de uma linha de produção é encontrar o posto de trabalho ou máquina que está a estrangular (*bottleneck*) o sistema e fazer apenas a programação para essa (Roldão and Ribeiro 2014).

### 1.1.2.1.2.2. Linhas reconfiguráveis

Como foi referido anteriormente, hoje em dia para que as empresas obtenham sucesso no mercado, é fundamental que exista flexibilidade na linha de produção. Com esse fator em conta é possível obter a capacidade de produção pretendida e suportar grandes níveis de incerteza associada á procura do mercado.

Existem várias estratégias para resolver problemas associados a flexibilidade, entre outros as principais são os layouts dinâmicos, robustos e reconfiguráveis (Maganha and Silva 2017). O principal objetivo dos layouts dinâmicos e robustos é encontrar um planeamento que satisfaça a procura que foi prevista. No entanto, estas metodologias de obtenção do plano de produção nem sempre funcionam em casos de estudo reais. Uma vez que é praticamente impossível prever o que vai ser preciso produzir e por consequência as mudanças que precisam de ser feitas para tornar o plano exequível. Quando aplicada a estratégia de layout reconfiguráveis muitas vezes o plano de produção tem que ser feito em

**Formatou:** Tipo de letra: Times New Roman, Cor do tipo de letra: Automática, Português (Portugal)

Comentado [SM11]: Gostei muito desta secção

tempo real, não deixando muita margem para os gestores conseguirem organizar o chão de fábrica (Meng, Heragu, and Zijm 2004).

Fica então disponível a última estratégia, layouts reconfiguráveis, esta sustenta-se na possibilidade de as *workstations*, ou seja, um conjunto de células ou máquinas são agrupadas de acordo com a sua função ou de forma a poderem executar determinadas tarefas, poderem ser movidas, e desta forma torna todo o problema de reconfigurar o layout do chão de fábrica muito mais acessível. Claro que isto só é viável se os custos e o tempo necessário para cumprir esta tarefas forem reduzidos (Abdi and Labib 2003). Quando aplicada esta última ideia é de esperar uma ligeira perda na capacidade de produção da linha (Maganha and Silva 2017).

Quando utilizada a metodologia de layouts reconfiguráveis esta tem em consideração as transações entre este período e o próximo minimizando o custo de realocação e poupando no transporte de material e custos de inventario.(Meng, Heragu, and Zijm 2004)

Nesta dissertação será considerada uma abordagem com layout reconfiguráveis, uma vez que a qualquer momento é possível proceder á alteração das ordens das tarefas bem como a atribuição dos recursos aos diversos postos de trabalho.

### 1.1.3.1.2.3. Métodos de otimização

As abordagens matemáticas usadas nesta dissertação serão a Programação Linear (LP) e a Programação Linear Inteira Mista (MILP). Quando é pretendido modelar problemas de escalonamento é inevitável o uso de variáveis inteiras. A abordagem MILP é considerada sempre que temos necessidade de ter variáveis lineares e inteiras. As restrições e função objetivo terão também de ser lineares para puderem ser consideradas como programação linear inteira mista. Ao analisar a natureza combinatoria destes modelos, é facilmente compreendido que a enumeração de todas as combinações dos valores das variáveis de decisão é praticamente impossível. Com a técnica Branch-and-Bound (B&B) é possível a resolução deste problema.(Pereira 2018)

Devido à natureza combinatoria natureza dos problemas, associada a decisões binárias, como atribuições de unidades de tarefas, sequenciamento de tarefas, trocas e tarefas de armazenamento, problemas com um número significativo de tarefas e unidades de processamento e considerando o planeamento ou escalonamento de horizontes longos tende a

**Comentado [SM12]:** Rescrever frase! Não se percebe.

**Formatou:** Não Realce

**Formatou:** Tipo de letra: Não Itálico, Não Realce

**Comentado [SM13]:** Esta quem? Não ser percebe a ligação da frase. rescrever por favor

**Formatou:** Não Realce

**Comentado [SM14]:** Excelente! Fala explicar aqui como?

**Comentado [SM15]:** Este paragrafo tem ser reformulado consideravelmente. Inspira-te com este texto (não copiar ok?) "The models developed in this thesis apply well known mathematical approaches, such as Linear Programming (LP) and Mixed Integer Linear Programming (MILP). To address the computational complexity of some scheduling instances, decomposition methods have also been used. Modeling scheduling problems invariably requires integer variables, which results into models having both continuous and integer variables. Due to the combinatorial nature of the problems, a complete enumeration of all possible values of the decision variables is impractical. To solve this type of problems the branch-and-bound (B&B) technique is generally applied. B&B is an enumeration algorithm that applies a partitioning process to cut a lot of the enumeration whenever possible. Current implementations of B&B take advantage of extraordinary theoretical progresses and are in practice quite efficient. In a nutshell, B&B computes the *Linear Relaxation* of the MILP problem at each node of the enumeration tree and keeps record of the best integer solution found and of the linear relaxation solution and value to find bounds on the optimal values for the integer programs (Johnson et al., 2000). Nowadays, B&B is part of advanced solvers such

as CPLEX that include a preprocessing stage and heuristics to speed up the resolution time.

However, many scheduling problems can hardly be solved by exact methods (as B&B) in an acceptable amount of time. These problems usually deal with a large number of resources, tasks, and mainly with a large number of time intervals. Moreover, if we consider some complicating constraints as sequence-dependent changeovers and temporary storage in the processing units, the resolution time tends to be prohibitive and the quality of the solutions tends to deteriorate very rapidly. Alternatively, decomposition techniques can be applied to obtain satisfactory solutions quickly. In this work, we have applied aggregated model formulations, task-unit aggregation, and time-based decompositions.

In this research, the case study naturally played a very important role. Data collection for analysis and interpretation was performed in the company and used later to build the scheduling instances. Due to the lack of coherent information structures, data was firstly arranged to be used then by the scheduling models. In

**Comentado [SM16]:** Falta citação



ser difícil resolver com métodos exatos e uma enumeração completa de todos os valores possíveis das variáveis é impraticável. (Little, J.D. 1963) Atuais implementações do B&B aproveitam os extraordinários progressos teóricos e são na prática bastante eficientes. Em poucas palavras, a B&B calcula o problema de Relaxamento Linear do MILP em cada nó da árvore de enumeração e mantém registo da melhor solução inteira encontrada e de a solução de relaxamento linear (Johnson et al., 2000). Atualmente, o B&B faz parte de soluções avançadas como o CPLEX que incluem um estágio de pré-processamento e heurísticas para acelerar o tempo de resolução. No entanto, muitos problemas de escalonamento dificilmente podem ser resolvidos por métodos exatos (como B&B) dentro de um período de tempo aceitável, ou seja, um tempo que seja viável para as indústrias.

Tem em vista casos de estudo reais, estes geralmente lidam com um grande número de recursos, tarefas e principalmente com um grande número de intervalos de tempo. Além disso, se se considerar algumas restrições como trocas de produtos e stock intermedio (buffers), o tempo de resolução tende a aumentar e a qualidade das soluções tende a degradar-se. Alternativamente, técnicas de decomposição podem ser aplicadas para obter soluções satisfatórias em tempo útil (Taylor et al. 2013).

### 1.2.1.3. Objetivos da dissertação

Com este trabalho pretende-se otimizar uma linha de produção, ao balancear e potenciar a utilização dos recursos num determinado período. Serão analisadas diversas instâncias com parâmetros diferentes, avaliando em cada uma delas qual o efeito que a alteração feita produz no *output* da linha. Assim no final deste trabalho, será possível responder às seguintes questões:

1. em que medida o número e alocação de robôs e/ou humanos afeta o output da linha?
2. qual o impacto de variáveis como a velocidade do robô no desempenho operacional da linha?
3. considerando a utilização dos recursos e o *output* da linha, qual a melhor configuração da linha de produção?

Comentado [SM17]: Falta citação

Formatou: Não Realce

Comentado [SM18]: Termos em inglês devem estar em itálico

### **1.3.1.4. Estrutura da dissertação**

O presente trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos: introdução, enquadramento teórico, abordagem metodológica, caso de estudo, análise de resultados e conclusões e trabalhos futuros.

No primeiro capítulo é feita uma pequena abordagem ao tema em estudo e dos principais objetivos. Na revisão da literatura será feita a análise de alguns conceitos fundamentais para a realização deste trabalho. No terceiro capítulo serão apresentados o modelo desenvolvido e a metodologia utilizada. No capítulo quatro, será apresentado o caso de estudo, enunciando as várias instâncias em estudo. Na análise de resultados, capítulo cinco, será apresentada uma instância de controlo de forma a validar o modelo criado. De seguida é feita a apresentação dos resultados obtidos e sua análise. No último capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho e possíveis trabalhos futuros.

## 2. Enquadramento teórico

Devido a diversos fatores como a customização de produtos, elevada qualidade, maior competitividade leva a que seja essencial desenvolver ferramentas que permitam lidar com o planeamento da produção e seu escalonamento mais facilmente.

Na literatura surgem bastantes modelos que foram desenvolvidos e posteriormente melhorados por diversos autores. Para a seleção dos artigos foi feita uma primeira pesquisa utilização um conjunto de palavras-chave, entre elas *planning*, *scheduling*, COLBOTS, *collaborative robotics*, *optimization* e *resource-task network (RTN)*, e *reconfigurable production lines*. De acordo com o título dos artigos, era analisado o resumo, caso este apresenta-se interesse para o trabalho era feita uma leitura da introdução e da conclusão. Durante a análise da introdução de alguns artigos anteriormente selecionados, eram mencionados outros autores como suporte ao trabalho que estaria em estudo, era então revista a bibliografia. Após isto, alguns artigos tornam-se recorrentes, a partir desse momento foi prosseguido o trabalho de análise dos documentos, mas de forma mais detalhada e exaustiva.

### 2.1. Planeamento e escalonamento

Foi com Frederick W. Taylor (1856-1915) que foi possível começar a considerar a gestão como uma disciplina (Hopp and Spearman 1996). Após o seu contributo, vários autores prosseguiram o estudo. Duas ferramentas fundamentais para uma gestão eficiente são, o planeamento (produção, das intervenções de manutenção) e o escalonamento. Sem o uso destas o WIP (*work in progress*) poderá aumentar e conseqüentemente haverá uma maior dificuldade de cumprir o *lead time* esperado pelos clientes (Roldão and Ribeiro 2014).

O planeamento da produção é utilizado para melhorar a utilização dos recursos de produção. Conseguindo com isto cumprir os prazos e a procura do mercado (Gelders and Wassenhove 1981).

Comentado [SM19]: Rever isto! Parece português do Brasil

Comentado [SM20]: Corrigir bibliografia para que as letras fiquem minúsculas

O escalonamento é associado á alocação de tarefas e recursos a diferentes postos de trabalho em prol de um certo critério (Graves 1981). A preocupação com o desenvolvimento de ferramentas que permitam realizar um bom planeamento e escalonamento de uma fábrica existe desde o final dos anos setenta. Mauderli e Rippin, em 1979, geraram e analisaram diversas estratégias para a planeamento da produção de lote de produtos (A.Mauderli and D.W.T.Rippin 1979). Reklaitis, em 1989, devida a incerteza associada a procura, criou uma formulação que permite-se resolver esse problema (H.S.Wellons and G.V.Reklaitis 1989).

Nos anos seguintes, diversos investigadores procuram desenvolver e melhorar as *framework* existentes para obtenção de melhores resultados nas áreas de planeamento e escalonamento. Por volta de 1995, vários autores tentaram resolver o problema de realizar o escalonamento para lotes de grande escala, entre eles salienta-se o trabalho de Subrahmanyam, Pekny, Basset e Reklaitis (Subrahmanyam et al. 1995). Devido ao elevado número de variáveis associado a problemas de grande dimensão, a sua resolução tende a ser muito morosa e consequentemente dependente das capacidades dos recursos tecnológicos disponíveis. Uma solução proposta foi a decomposição em pequenos problemas, de forma que o tempo de obtenção de uma solução seja razoável e permita ao gestor, implementar as soluções obtidas em tempo útil (Reklaitis 1995).

Durante esse período, foram considerados casos de estudos um pouco por todas as áreas da manufatura (Wellons and Reklaitis 1991; C., Shah, and Pantelides 1991). Com o planeamento de processos e escalonamento da produção, a utilização de recursos, o tempo de entrega de produtos é fortemente influenciada.

Hoje em dia, a manufatura está mais focada em reduzir o lead time e garantir elevados padrões de qualidade, bem como assegurar variedade de produtos a preços competitivos. Ao utilizar a abordagem tradicional referida pelos autores anteriormente enunciados, estes novos objetivos deixam de ser possíveis de cumprir. Isso acontece porque na metodologia onde o planeamento e o escalonamento são abordados separadamente vão existir problemas como: os recursos não estarem sempre disponíveis para a produção, devido a manutenção ou outros aspetos, o facto do escalonamento ser aplicado apenas a uma máquina por operação, ignorando máquinas alternativas, isto leva a que o plano de produção calculado não seja cumprido, pois existe uma falha entre o planeamento e o escalonamento.

Estas dificuldades podem ser ultrapassadas ao utilizar uma abordagem integrada entre planeamento e escalonamento, como foi proposto por diversos autores (Chryssolouris and Chen (1985), Lee and Kim (2001), Kumar and Rajotia (2003)).(Phanden, Jain, and Verma 2011).

Finalmente salienta-se uma elevada variedade de metodologias e formulações matemáticas existentes para a resolução de problemas de otimização de escalonamento de uma linha de produção (Wassick and Ferrio 2011).

## 2.2. Linhas de montagem reconfiguráveis

Com o aumento da competitividade, as mudanças rápidas no campo da tecnologia e a necessidade de responder às necessidades dos clientes, pede que os layouts das linhas de montagens das fábricas fiquem cada vez mais aptos a essas mudanças. Para que estas alterações sejam viáveis é necessário garantir que o custo e a rapidez com que estas precisam de ser feitas possam ser suportadas pela entidade (Kochhar and Heragu 1999).

Por vezes selecionar o melhor *layout* para o chão de fábrica é uma tarefa complexa e tem grande importância na performance do sistema. Por isso a possibilidade de mudar sempre que necessário a disposição das *workstations* é extremamente vantajoso em ambientes como o da manufatura onde grandes níveis de incerteza estão sempre presentes.

Este conceito *Reconfigurable Layout Problem* (RLP) surge nos anos noventa para lidar com linhas de montagem dinâmicas e com problemas que derivam da incerteza. Deste modo o *layout* pode ser ajustado, mudado, ou seja, ser flexível o suficiente de modo a que mudança no plano de produção não afete o tempo de ciclo da linha (Maganha and Silva 2017). Seguindo uma estratégia RLP, podemos apenas movimentar recursos como máquinas, tapetes rolantes, componentes, entre outros. Sendo por isso bastante rápida a sua mudança (Mehrabi, Ulsoy, and Koren 2000).

Neste trabalho será estudado como um sistema reconfigurável pode afetar o *output* do sistema. Para isso é possibilitado que os recursos robóticos e humanos se desloquem entre postos de trabalho, sendo por isso chamados onde são necessários.

**Comentado [SM21]:** Inserir referências  
1.moniz 2014\_ Solution Methodology for Scheduling Problems in Batch Plants

**Comentado [vs22R21]:** achei que se enquadrava melhor na secção 2.4

### 2.3. Robótica colaborativa

O uso de robôs que possibilitam a interação com humanos, oferecem um novo conjunto de possibilidades, principalmente em linhas de montagem. Na última década foram realizados vários estudos para conseguir adaptar as linhas de produção às mudanças da procura do mercado (Nikolakis et al. 2018). Uma das adaptações passa por tornar as linhas mais flexíveis, uma forma de conseguir esse objetivo é a implementação de robôs que possam trabalhar em qualquer tarefa sem ocorrer na limitação de não poder trabalhar com humanos ao mesmo tempo.

Este tipo de robôs permitem a cooperação com humanos, o que torna mais eficiente o sistema de produção. Ao combinar o humano e a máquina em tarefas de montagem é possível retirar o melhor de cada parte. Um sistema automático tem as vantagens de trabalhar sem falhas e com elevada produtividade, no entanto, exige programação e tem dificuldade em trabalhar com partes flexíveis ou com tarefas complexas (Casalino et al. 2018)(Krüger, Lien, and Verl 2009). Por outro lado, um humano tem elevada capacidade de adaptação e incomparáveis habilidades para lidar com tarefas complexas, mas carece de precisão e força (Krüger, Lien, and Verl 2009).

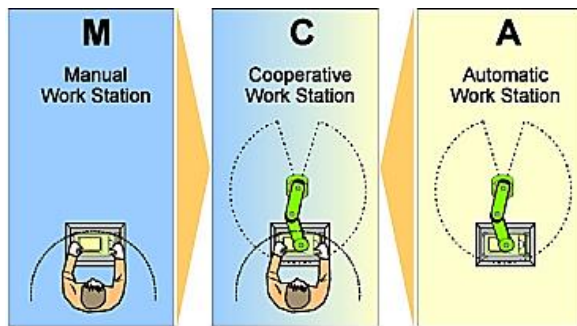


Figura 2.1. Posto de trabalho colaborativo (Krüger, Lien, and Verl 2009)

Estas linhas de montagem híbridas (ver [Figura 2.1](#)~~Figura 2.4~~) já são utilizadas na indústria a mais de duas décadas (Krüger, Lien, and Verl 2009)(Lien 2001). No futuro, será cada vez mais comum no meio industrial a introdução de *Human Robot Collaboration* (HRC), i.e., robôs e humanos a partilhar um posto de trabalho. Contudo nestas situações é

Comentado [SM23]: Falta citação.

Formatou: Tipo de letra: (predefinido) Times New Roman, 12 pt

necessário ter em conta a segurança do trabalhador (Lippi and Marino 2018) (Casalino et al. 2018).

## 2.4. Otimização do planeamento e escalonamento

A tomada de decisões na indústria é de extrema complexidade e dificuldade, visto que pode envolver aspetos estratégicos e operacionais (Moniz et al. 2014). Neste âmbito, a atenção e interesse das indústrias para a integração de modelos de otimização para ajudar na tomada de decisões e cada vez mais real e necessário.

As soluções obtidas segundo metodologias de otimização são de extrema importância, uma vez que através delas conseguimos obter uma solução ótima, ou muito perto de disso. Como referido anteriormente, os resultados são dados em função dos objetivos e das restrições colocadas (Figura 2.2 Figura 2.2).

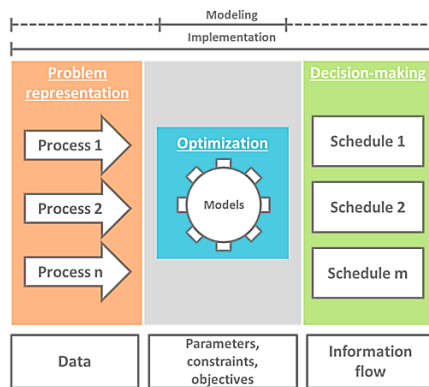


Figura 2.2. Metodologia conceptual para a obtenção de solução (Moniz et al. 2014)

Quando aplicada a linhas de produção, na maioria dos casos pretendemos definir uma ordem para as tarefas ser executadas de forma a minimizar atrasos e número de workstations (Ghosh and Gagnon 1989).

Quando é discutido o tema de balanceamento de linhas de montagem (ALB) é habitual considerar modelos de otimização para a resolução do problema. Desde a primeira

Comentado [SM24]: Secção muito incompleta. Desenvolver com mais artigos

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Tipo de letra: Negrito, Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Tipo de letra: Negrito, Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

formulação matemática proposta por Salveson em 1955, vários estudos foram desenvolvidos por diversos autores que consideravam linhas em U, estações de trabalho em paralelo ou processos alternativos (Boysen, Fliedner, and Scholl 2007).

Nos anos 70 e 80, segundo Chase (1974) e Schöniger e Spingler (1989) começou a surgir a necessidade de criar metodologias que pudessem ser consideradas em problemas reais, uma vez que até à data os modelos desenvolvidos não eram usados porque não eram obtidos resultados satisfatórios (Ghosh and Gagnon 1989; Boysen, Fliedner, and Scholl 2007). Isto acontecia porque os computadores não possuíam a capacidade de resolver problemas de grande escala, sendo por isso, o grande foco de autores como Hoffman (1963), Dar-El (1973), Wee and Magazine (1981), Baybars (1986), entre outros.

Em 1999, Scholl analisou diversos tipos de balanceamento de linhas de montagem e dividiu assim os problemas de ALB em dois casos: SALBP-1 (*Simple Assembly Line Problem – 1*) e SALBP-2. (*Simple Assembly Line Problem – 2*). O primeiro procura minimizar o número de postos de trabalho alocando as tarefas as diversas *workstations*, já o segundo procura maximizar a taxa de produção, minimizando os tempos não produtivos.

Relativamente aos métodos de resolução, salienta-se a utilização de métodos exatos, não exatos ou híbridos. Os métodos exatos incluem MILP e MINLP, já os não exatos são todas as heurísticas, meta-heurísticas ou abordagens com inteligência artificial (Moniz et al. 2014).

O foco nesta dissertação é maximizar a produção num intervalo de tempo fixo, minimizando os tempos não produtivos que por sua vez faz com a taxa de utilização dos recursos aumente.

## 2.5. Resource Task Network

O modelo RTN com tempo discretizado, foi proposto por Pantelides (1994) e posteriormente aperfeiçoado por Barbosa-Povoa para o *design* de qualquer tipo de processo (Pantelides 1994).

Mais tarde, extensões foram feitas, sendo desenvolvida uma variante do modelo RTN mas agora com uma formulação com tempo contínuo. O objetivo desta formulação é mitigar as limitações associadas à discretização do tempo. No entanto, esta abordagem

Comentado [SM25]: Estas citações não seguem o mesmo estilo

Comentado [SM26]: Inserir referências  
1.Moniz 2012\_ Scheduling With Equipment Redesign  
2.Moniz 2013\_ New General Discrete-Time Scheduling Model for Multipurpos Batch Plants  
3.moniz 2014\_ simultaneous regular and non-regular production scheduling of multipurpose batch plants  
Moniz 2015\_ A simulation-optimization approach for production planning and scheduling

Comentado [SM27]: Esta citação não está no formato correto. Corrigir por favor

Formatou: Não Realce

Formatou: Não Realce



embora mais precisa, tem tendencialmente uma resolução é mais lenta (Barbosa-Póvoa 2007).

No RTN são contabilizados dois tipos de entidades: tarefas e recursos. Em suma, uma tarefa é uma operação que consome ou liberta recursos. Um exemplo desta metodologia é demonstrado na [Figura 2.3](#) ~~Figura 2.3~~, onde qualquer recurso disponível no chão de fábrica é representado com um círculo e as tarefas são apresentadas com um retângulo (Moniz, Barbosa-Póvoa, and Pinho De Sousa 2013). Os recursos para além de matérias-primas, podem também ser máquinas, robôs, entre outros.

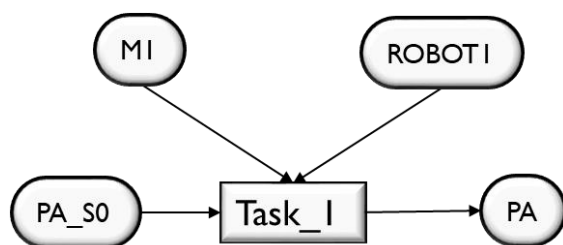


Figura 2.3. Representação RTN: Produção do produto A

A utilização desta metodologia pode ser vantajosa na medida em que é mais abrangente e conceitualmente mais elegante que outro de tipo de abordagens (Méndez et al. 2006). O facto de não haver distinção entre os vários tipos recursos permite que estes sejam consumidos ou produzidos pelas tarefas a qualquer instante. Os equipamentos usados durante as tarefas podem ser também tratados como recursos.

Como referido existem dois tipos de formulação para esta metodologia, a formulação com tempos contínuos e a formulação com tempos discretizados. Nesta dissertação será usado a última. Será feita uma breve revisão do modelo original RTN na seção 3.2..

Com a implementação da formulação base do modelo RTN é possível aplicar a vários problemas práticos, no entanto com o desenvolvimento de algumas extensões a resolução desses problemas torna-se mais eficaz e aplicável a exemplos mais complexos e focados nas respetivas áreas de estudo do problema. Muitas vezes encontrar um escalonamento perfeito para determinado processo não é fácil, devida á complexidade das

restrições. Uma maneira de resolver esse problema é a introdução de uma variável que permita suavizar a restrição de excesso de recursos (Wassick and Ferrio 2011).

Estas extensões conjugadas podem ser aplicadas a exemplos reais de grande interesse na indústria, como por exemplo como fazer um bom armazenamento, ou um escalonamento contínuo, etc.

Surge então a necessidade de desenvolver uma extensão ao modelo referido de forma a conseguir um escalonamento contínuo para máquinas e robôs e desta forma balancear a produção. No capítulo 3, será abordada a metodologia utilizada nesta dissertação.

### **3. Abordagem metodológica**

Neste capítulo irá ser abordada a metodologia usada para resolver o problema de escalonamento de robôs colaborativos.

Esta dissertação irá utilizar uma abordagem de otimização de programação linear mista (MILP). Esta é usada em todos os tipos de organizações e aplicada aos mais variados problemas. O termo otimização em engenharia está relacionado com o estudo de problemas em que se pretende atingir um determinado objetivo, seja este de maximizar o lucro, produção, ou mesmo minimizar os custos. Para isso, são criadas um conjunto de variáveis e restrições que permitam obter a solução ótima para o caso em estudo, ou caso não seja possível uma solução ótima pelo menos uma solução admissível. O facto de possuírem uma base matemática bem desenvolvida permite que esta possa ser alterada com alguma facilidade.

#### **3.1. Descrição do problema**

Como foi definido anteriormente, esta dissertação tem como principal objetivo a otimização de uma linha de produção através do seu balanceamento e maximização dos recursos utilizados. Deste modo desenvolveu-se um modelo base em que se considera 3 tipos variáveis de decisão: tamanho do lote de cada tarefa em cada instante, nível de recursos em cada instante e número de vezes que cada tarefa ocorre em cada instante.

### 3.2. Modelo base RTN (formulação discreta)

As restrições no modelo RTN são descritas abaixo. Na expressão 3.1 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, temos um balanço do nível de recursos em cada tempo  $t$ , o termo  $\prod_{r,t}$  é usado para modelar a chegada de recursos ou a saída destes, ou seja, a procura. Os recursos que estão no sistema são restritos com limites máximos e mínimos  $(R_{r,t}^{min}, R_{r,t}^{max})$  com a expressão 3.2 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**  $\phi$  lote da tarefa  $k$  é limitado pela capacidade do equipamento, ver expressão 3.3.

$$R_{r,t} = R_{r,t-1} + \sum_k \sum_{\theta=0}^{\tau_k} (\mu_{k,r,\theta} * N_{k,t-\theta} + v_{k,r,\theta} * \xi_{k,r-\theta}) + \prod_{r,t} \quad \forall r, t \quad (3.1)$$

$$R_{r,t}^{min} \leq R_{r,t} \leq R_{r,t}^{max} \quad \forall r, t \quad (3.2)$$

$$V_k^{min} * N_{k,t} \leq \xi_{k,t} \leq V_k^{max} * N_{k,t} \quad \forall k, t \quad (3.3)$$

### 3.3. Modelo de otimização proposto

#### 3.3.1. Formulação matemática

A formulação matemática será apresentada a seguir. Para uma melhor compreensão será adotado a seguinte escrita: índices serão a letras minúsculas e a itálico, sets estarão a negrito e maiúsculas, as variáveis estarão a maiúsculas.

Tabela 3.1. Elementos da formulação - índices

ÍNDICES	
$s \in \mathbf{S}$	Sinais gerados
$k \in \mathbf{K}$	Tarefas executadas
$t \in \mathbf{H}$	Períodos: intervalos de tempo (H=19)

$p \in P$	Produtos produzidos
$R \in R$	Recursos utilizados
$\theta$	Tempo contabilizado desde o início de cada tarefa (0,1, 2...)

Tabela 3.2. Elementos da formulação - Sets

**SETS**

<b>S</b>	Sinais gerados durante o período
<b>K</b>	Tarefas executadas durante o período
<b>E</b>	Máquinas usadas durante o período
<b>R</b>	Recursos usados durante o período
<b>H</b>	Períodos: intervalos de tempo com determinada duração
<b>W</b>	Produtos iniciais (PA_S0...)
<b>I</b>	Produtos intermédios (PA_S1, PA_S2...)
<b>P</b>	Produtos acabados (PA)

Tabela 3.3. Elementos da formulação – Variáveis

**VARIÁVEIS**

$R_{r,t}$	Excesso do recurso r no instante t
$N_{p,k,t}$	Número de tarefas k executadas no instante t
$\xi_{p,k,t}$	Quantidade de material processado pela tarefa k, no instante t
$NP$	Produção líquida

Tabela 3.4. Elementos da formulação – Parâmetros

**PARÂMETROS**

$R_{r,t}^{max}$	Quantidade máxima disponível do recurso r no instante t
$R_{r,t}^{min}$	Quantidade mínima disponível do recurso r no instante t (= 0)
$v_{p,k,r,\theta}$	Parâmetro que relaciona o produto p, a tarefa k, o recurso r e o tempo contabilizado após o início de cada tarefa $\theta$
$\mu_{p,k,r,\theta}$	Parâmetro que relaciona o produto p, a tarefa k, o recurso r e o tempo contabilizado após o início de cada tarefa $\theta$
$V_{p,k,r}^{max}$	Quantidade máxima de recurso r, processada pela tarefa k
$V_{p,k,r}^{min}$	Quantidade mínima de recurso r, processada pela tarefa k

Nesta formulação, a tipologia utilizada para mapear o tempo é a de uma operação periódica, ou seja, o horizonte temporal (**H**) é dividido em intervalos de tempo fixos e

constantes, a discretização do tempo foi pequena o suficiente de forma a garantir que cada tarefa começava e terminava nos limites dos intervalos de tempos considerados. Cada intervalo de tempo corresponde a 30s. Neste tipo de metodologia, o último intervalo de tempo refere-se ao primeiro tempo. Uma vez que o ciclo termina em  $t=19$ , este deverá ser o ponto de partida para o próximo ciclo e assim sucessivamente. Para facilitar a compreensão desta formulação matemática, a [Figura 3.1](#) demonstra uma representação esquemática deste escalonamento periódico.

Formatou: Português (Portugal)

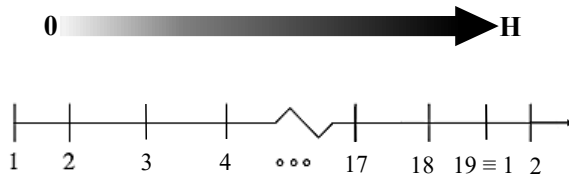


Figura 3.1. Representação esquemática do horizonte temporal

Como referido, a função objetivo terá como foco maximizar a produção.

$$Max Production = \frac{1}{T} * \sum_P NP \quad \forall P \tag{3.4}$$

A NP corresponde á produção líquida durante o intervalo de tempo considerado, esta é dada pela [Erro! A origem da referência não foi encontrada.](#) seguinte expressão

$$NP = Recursos_{finais} - Recursos_{iniciais} = R_{r,T+1} - R_{r,0} \quad \forall r \in P \tag{3.5}$$

Como em qualquer sistema a utilização dos recursos não pode exceder o que está disponível, desta forma surge a necessidade de criar dois tipos de restrições de forma a garantir que essa lógica é cumprida. Cada tarefa terá um tempo de processamento fixo ( $\tau_k$ ).

A caraterização de cada tarefa iniciada a um qualquer tempo  $t$ , é feita através de duas variáveis:  $N_{k,t}$  e  $\xi_{k,t}$ . A primeira é uma variável inteira, que representa o número de vezes que a tarefa  $k$  se inicia no instante  $t$  e a segunda é uma variável contínua a qual determina o tamanho da tarefa (lote). Quando uma tarefa é iniciada, os recursos serão consumidos e

produzidos, a quantidade de recursos produzidos no tempo  $\theta$  (relativamente ao início da tarefa) é dado pela segunda parcela da seguinte expressão.

$$R_{r,t} = R_{r,t-1} + \sum_{p \in P} \sum_{k \in k_{pr}} \sum_{\theta=0}^{\tau_{pk}} (v_{p,k,r,\theta} * N_{p,k,r,\Omega(t-\theta)}) \quad \forall r \in M, t \in 1, \dots, T+1 \quad (3.7)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in k_{pr}} \sum_{t=\tau_{pk}+1}^t (N_{p,k,r,\Omega(t)} \leq R_{r,t}^{max}) \quad \forall r \in E, t \in 1, \dots, T \quad (3.8)$$

$$0 \leq R_{r,t} \leq R_{r,t}^{max} \quad \forall r \in R, t \in 1, \dots, T \quad (3.8)$$

$$R_{r,t} = R_{r,\Omega(t-1)} + \sum_{p \in P} \sum_{k \in k_{pr}} \sum_{\theta=0}^{\tau_{pk}} (\mu_{p,k,r,\theta} * N_{p,k,r,\Omega(t-\theta)}) \quad \forall r \in E \cup S, t \in 1, \dots, T \quad (3.9)$$

Os parâmetros  $\mu_{p,k,r,\theta}$  e  $v_{p,k,r,\theta}$  são conhecidos, estes assumem o valor -1 sempre que o recurso  $r$  é consumido ou está ocupado, durante a tarefa  $k$  ( $\theta = 0, 1 \dots \tau_k$ ) e o valor +1 sempre que é produzido ou fica livre. O estado do recurso apenas pode ser alterado nos limites de cada intervalo de tempo ( $\theta = 0$  ou  $\theta = \tau_k$ ). A quantidade do recurso  $r$  não utilizada nesse instante  $t$  é dada pela variável  $R_{r,t}$ . É **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** limitado a quantidade de recursos usados em cada instante garantindo que estão sempre abaixo do valor máximo e nunca inferior a zero. Pretende-se garantir através de um balanço de recursos que a quantidade do recurso  $r$ , no instante  $t$  é a mesma do que a quantidade do recurso  $r$  no instante  $t-1$  mais a produção ou consumo desse mesmo recurso  $r$ , no instante  $t$ .

A expressão 3.9 garante que a quantidade do recurso  $r$ , em uso não ultrapassa a soma do quantidade do recurso  $r$  em uso de todas as tarefas, em cada instante de tempo.

Comentado [SM29]: Atenção que a numeração das equações está errada. Corrigir!!!!

Comentado [SM30]: Rever formulação para estar de acordo com as seguintes expressões

Com a expressão 3.10 delimitamos o tamanho do lote da tarefa  $k$ , no instante  $t$ . Onde o valor máximo é dado pelo tamanho máximo que o lote da tarefa  $k$  pode assumir vezes o número de tarefas  $k$  que se iniciam no instante  $t$ . O valor mínimo é similar apenas consideramos o tamanho mínimo do lote da tarefa  $k$ .

$$V_{p,k,r}^{\min} * N_{p,k,r,t} \leq \xi_{p,k,t} \leq V_{p,k,r}^{\max} * N_{p,k,r,t} \quad \forall p \in P, r \in E, k \in K_{p,r}, t \in 1, \dots, T \quad (3.10)$$

De forma a garantir que apenas uma tarefa  $k$  se inicia em cada instante foi introduzida a seguinte restrição.

$$R_{s,t-1} \leq (1 - N_{k,t}) * 100 \quad \forall s \in S, k \in K_s, t \in 1, \dots, T \quad (3.12)$$

equação 3.2

$$\sum_{k \in K_p} \sum_{t=0}^{t_k-1} N_{k,p(t)} \leq 1 \quad \forall p \in E, t \in 1, \dots, T \quad (3.1)$$

A restrição 3.12 assegura que uma nova tarefa não pode iniciar se o colbot não visitou a tarefa anterior.

$$R_{s,t-1} \leq (1 - N_{k,t}) * 100 \quad \forall s \in S, k \in K_s, t \in 1, \dots, T \quad (3.12)$$

### 3.3.2. Implementação do modelo e software

Existem vários solvers onde seria possível implementar o modelo em estudo, tais como o GUROBI, CPLEX, XPRESS, entre outros.

Devido ao fácil acesso, desempenho e qualidade, e o facto de este já ter sido usado por outros autores para a implementação do modelo RTN (Wassick and Ferrio 2011), o software escolhido foi o CPLEX. Este integra seis solvers: Linear Programming (LP),

- Formatou: Tipo de letra: Não Itálico
- Formatou: Tipo de letra: Não Itálico
- Formatou: Tipo de letra: Não Itálico
- Formatou: Tipo de letra: Não Itálico
- Formatada: Avanço: Primeira linha: 0 cm
- Formatou: Tipo de letra: Não Itálico
- Formatou: Tipo de letra: Não Itálico
- Formatou: Tipo de letra: Não Itálico
- Formatou: Tipo de letra: Times, Não Itálico

- Comentado [SM31]: Atualizar numero
- Comentado [vs32R31]:

- Comentado [SM33]: Gostei...

Mixed Integer Linear Programming (MILP), Mixed Integer Quadratically Programming (MIQP), Quadratically Constrained Programming (QCP), Quadratically Programming (QP), Mixed Integer Quadratically Constrained Programming (MIQCP). (IBM 2019)

Tendo em vista a natureza do problema em estudo, os de maior interesse são Linear Programming (LP) e Mixed Integer Linear Programming (MILP).

### 3.3.3. Dados de entrada e saída

Os dados de entrada para o modelo de otimização foram carregados a partir do Excel. A informação inserida no Excel é relativa ao número de tarefas e respetivo tempo de processamento, recursos e quantidade necessária dos mesmos. É também necessário inserir dados relativos ao tempo de escalonamento e ao número de intervalos de tempo em cada período.

Dados como a disponibilidades inicial e máxima dos recursos (matérias, máquinas, robôs, etc.) também é imprescindível.

Os resultados adquiridos serão escritos no mesmo formato, estes serão apresentados num diagrama de Gantt, onde será visível em que período e durante quanto tempo cada tarefa será executada e a respetiva quantidade. Também será criada uma tabela com a produção para o período considerado.

Com os dados de entrada inseridos a partir do Excel, a sua alteração ou pequena variação torna-se bastante simples, todos os dados podem ser modificados.

No entanto, como todas as variáveis estão relacionadas com os períodos quanto mais períodos ou tarefas foram adicionados ao modelo maior este se torna e consequentemente mais morosa a sua resolução.

Comentado [SM34]: OK



## 1.

CASO DE ESTUDO

## Caso de estudo

### 4. Caso de estudo

Nesta dissertação, será estudada uma linha de produção com 2 centros de trabalho, as quais estão distanciadas entre si de 30 m. A figura seguinte **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresenta o tempo de processamento em minutos. Neste caso de estudo serão estudadas 4 instâncias, as quais podem ser consultadas em anexo. Será aumentado gradualmente o grau de complexidade e por sua vez a representatividade do problema ao longo das diversas instâncias.

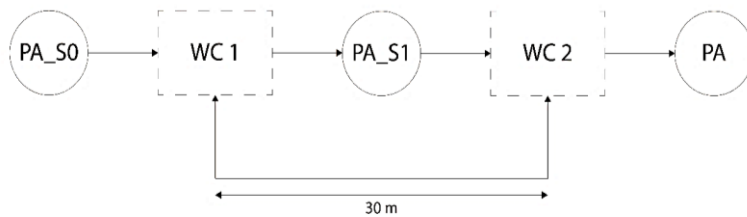


Figura 4.1. Representação esquemática do layout da linha de produção.

Na **Figura 4.2**, é representada em detalhe a tarefa 1. Esta tem uma duração de 3 unidades de tempo e a tarefa executada pelo robô terá apenas duração de 1 unidade de tempo. O robô terá liberdade de executar a sua parte da tarefa a qualquer instante, admitindo que esta se inicia e termina sempre em unidades de tempo inteiras. Ou seja, o robô nunca poderá iniciar a sua tarefa no instante 1.5 e terminar em 2.5, terá sempre de começar em 0 e terminar em 1 ou começar em 1 e terminar em 2 e assim sucessivamente.

Formatou: Português (Portugal)

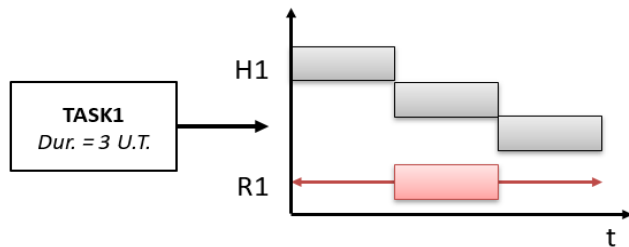


Figura 4.2. Representação detalhada da tarefa 1

#### 4.1. 1ª instância

Para a primeira instância, (Figura 4.3, Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.4) foram usadas duas tarefas. A primeira com 4 unidades de tempo e a segunda com 3. Ambas precisaram de um robô durante uma unidade de tempo para que a tarefa fica completa. Para isso quando a tarefa se iniciar será emitido um sinal (RobotNeededSignal1 para a tarefa 1 e RobotNeededSignal2 para a tarefa 2), existirá um robô para cada tarefa, não havendo por isso a deslocação do mesmo.

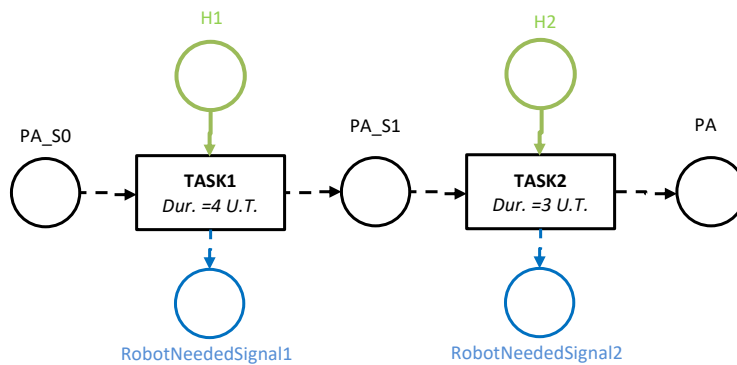


Figura 4.3. Representação RTN da 1ª instância.

1.

CASO DE ESTUDO

## Caso de estudo

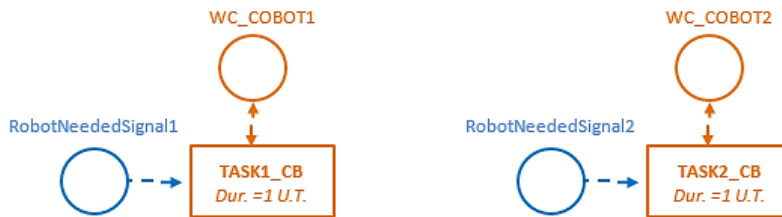


Figura 4.4. Representação RTN das tarefas colaborativas.

### 4.2. 2ª instância

Para a segunda instância, ~~(Figura 4.5, Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.6)~~ foram usadas duas tarefas. A primeira com 4 unidades de tempo e a segunda com 3. Ambas precisaram de um robô durante uma unidade de tempo para que a tarefa fica completa. Para isso quando a tarefa se iniciar será emitido um sinal (RobotNeededSignal1 para a tarefa 1 e RobotNeededSignal2 para a tarefa 2). Nesta instância como apenas existirá um robô, este será dividido pelas duas tarefas, não sendo contabilizada a distância percorrida nem o tempo que demora.

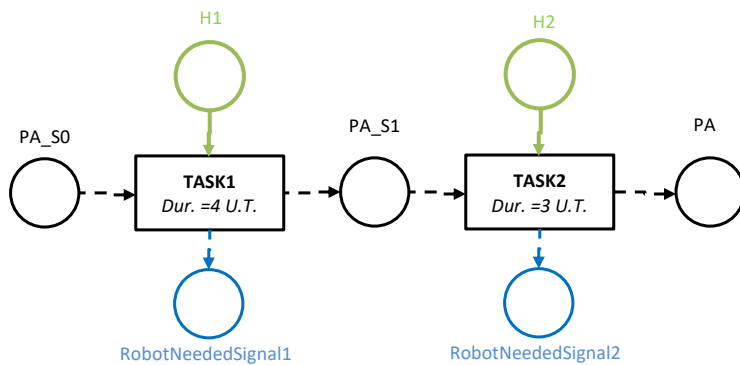


Figura 4.5. Representação RTN da instância 2

**Formatou:** Português (Portugal)

**Formatou:** Tipo de letra: Negrito, Português (Portugal)

**Formatou:** Português (Portugal)

**Formatou:** Tipo de letra: Negrito, Português (Portugal)

**Formatou:** Português (Portugal)

**Formatou:** Tipo de letra: Não Negrito

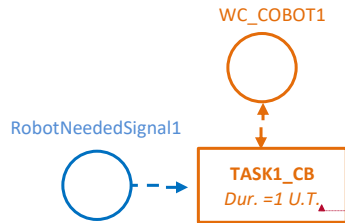


Figura 4.6. Representação RTN da instância 2

Formatou: Cor do tipo de letra: Cor 6, Contorno do Texto

### 4.3. 3ª instância

Na terceira instância, aspetos como a distância entre WC e velocidade do robô serão considerados. No que diz respeito a velocidade do robô, foi estudada a norma VDI 2510, na qual é indicada que a velocidade máxima permitida por um AGV (Autonomous Guide Vehicle), é de 1 m/s. Tendo em conta que o robô em estudo terá que se deslocar entre postos de trabalhos no chão de fábrica, este terá que cumprir a norma e apresentar segurança para com os trabalhadores humanos que partilharão a linha de produção com este. Foi então considerada uma velocidade para o AGV de 0,5 m/s.

Com isto e estimando que o comprimento da linha de produção, a distância entre centros de trabalho é de 30 m (Tabela 4.1 Tabela 4.1), podemos então calcular o tempo que o robô irá demorar a deslocar-se entre WC. Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** serão apresentados os valores obtidos.

Nas Figura 4.7 Figura 4.7, Figura 4.8 Figura 4.8, Figura 4.9 Figura 4.9, estão representados a instância 3, as tarefas colaborativas e as tarefas de setup, respetivamente.

Comentado [SM35]: Todas as tabelas das instâncias vão para anexo

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Tipo de letra: Negrito, Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Tipo de letra: Negrito, Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Tipo de letra: Não Negrito

Tabela 4.1. Distância em metros percorrida pelo robô entre WC

DISTANCIA [M]	WC1	WC2
WC1	0	30
WC2	30	0

# 1.

CASO DE ESTUDO

## Caso de estudo

Para calcular tempo, foi usada a  $\Delta t = \frac{\Delta x}{v}$ , onde foi introduzida a distância e a velocidade do robô.

Formatou: Cor do tipo de letra: Automática

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} \text{ [m/s]} \tag{4.1}$$

Tabela 4.2. Tempo em segundos que o robô demora a deslocar-se para entre WC.

TEMPO[S]	WC1	WC2
WC1	0	60
WC2	60	0

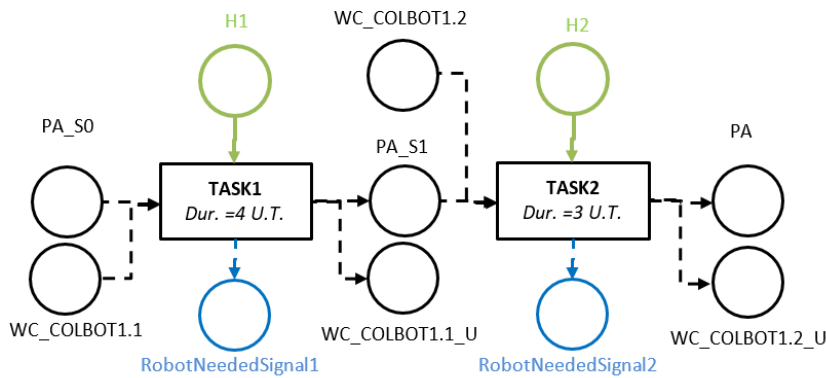


Figura 4.7. Representação RTN da instância 3

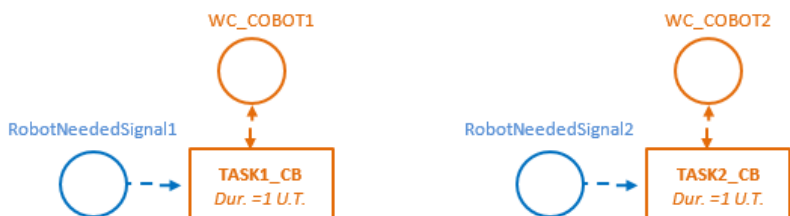


Figura 4.8. Representação RTN das tarefas colaborativas

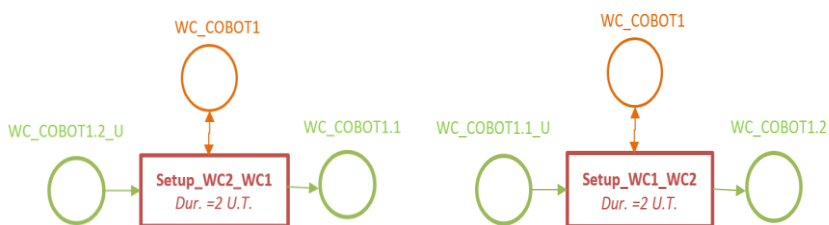


Figura 4.9. Representação RTN das tarefas de setup

#### 4.4. Resumo

Na ~~Tabela 4.3~~ Tabela 4.3 estão presentes as principais características de cada instância, estas são o número de robôs e humanos, a existência ou não de setup, qual a velocidade considerada para os recursos robóticos.

Tabela 4.3. Resumo das características das instâncias criadas.

Instância	Nº robôs	Nº humanos	Setup	Velocidade robô [m/s]
1	2	2	X	---

**Formatou:** Tipo de letra: Times New Roman, Português (Portugal)

**Comentado [SM36]:** Gostei desta tabela, deve ficar aqui.

**1.**

CASO DE ESTUDO

**Caso de estudo**

---

2	1	2	X	---
3	1	2	S	0,5





## 2. Análise de resultados

### 2.1. Validação do modelo

VALIDAÇÃO DO MODELO

## 5. Análise de resultados

### 5.1. Validação do modelo

Para validar o modelo foi criada uma instância de controle, onde todos os postos de trabalho terão um recurso robótico e um Humano a tempo inteiro. Será usada apenas 1 WC, 1 robô e um humano numa tarefa. Para analisar os resultados obtidos, foram criados diagramas de Gantt, facilitando a verificação do tempo de processamento da tarefa do humano e do robô, sendo praticamente imediata a validação do modelo.

Na [Figura 5.1](#) está representada a tarefa 1, o consumo e produção dos recursos materiais (PA\_S0 e PA), bem como a requisição do recurso humano e a emissão de um sinal em como necessita de um robô para concluir a tarefa.

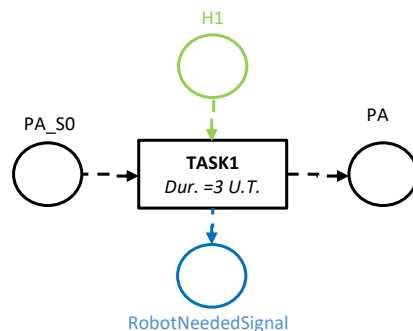


Figura 5.1. Representação da tarefa 1

Após a emissão do sinal em como precisa do robô para a conclusão da tarefa, este irá deslocar ao posto de trabalho durante o tempo de processamento em questão e executará a sua função. Esta terá a duração de uma unidade de tempo, quando se iniciar consumirá a sinal emitido e um robô disponível e quando terminar libertará o robô, ficando assim disponível para outra tarefa.

Comentado [SM37]: Esta instância é muito grande para validação. Usar aquela que está no modelo cplex em anexo

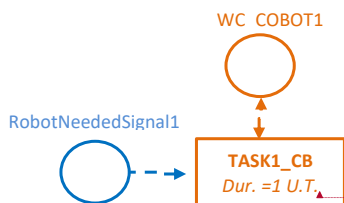


Figura 5.2. Representação da tarefa colaborativa do robô

Formatou: Cor do tipo de letra: Cor 6, Contorno do Texto

Inseridos os dados no Excel, é possível correr o modelo e obter resultados. Foram obtidos a unidades produzidos durante o tempo em estudo, que depois foram convertidas para o gráfico da ~~Figura 5.3~~ ~~Figura 5.3~~ para melhor compreensão e um mapa de escalonamento das tarefas. É facilmente verificado que o tempo de ciclo da linha é de 3 U.T. e que para o tempo considerado foram produzidas 600 unidades.

Formatou: Português (Portugal)

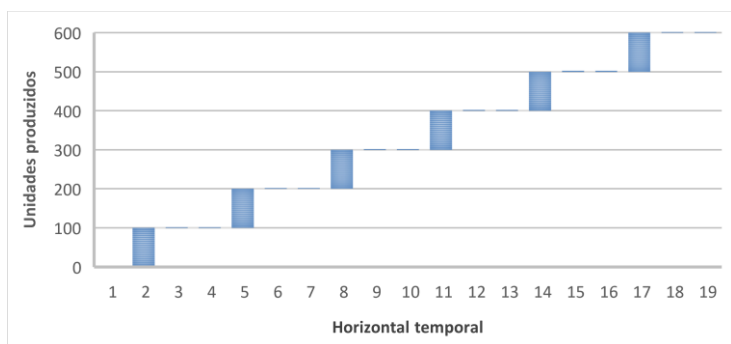


Figura 5.3. Gráfico da taxa de produção

Na análise da ~~Figura 5.4~~ ~~Figura 5.4~~, podemos concluir que o robô inicia a sua tarefa praticamente sempre no primeiro instante da tarefa 1 exceto um vez que a executa a meio. À medida que introduzimos mais tarefas e complexidade ao problema, mais diversidade no instante em que o robô realiza a sua tarefa pode ser observada.

Formatou: Português (Portugal)

Unit	Task	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
H1	TASK1			PA(100)	PA	PA	PA(100)	PA	PA	PA(100)	PA	PA	PA(100)	PA	PA	PA(100)	PA	PA	PA(100)	PA	PA
WC_COBOT1	TASK1_CB		PA(0)					PA(0)		PA(0)			PA(0)			PA(0)			PA(0)		

Figura 5.4. Escalonamento da linha de montagem

## 2. Análise de resultados

### 2.1. Validação do modelo

VALIDAÇÃO DO MODELO

---



## 2.2.

## Discussão de resultados

DISCUSSAO DE RESULTADOS

### 5.2. Discussão de resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para as diversas instâncias referidas no capítulo 4. Os resultados obtidos são comparados no mesmo domínio temporal, 19 intervalos de tempo.

Serão confrontados os resultados obtidos entre as instâncias que consideram tempos de *setup* com aquelas que estes foram desprezados, e de que forma isso afeta a produção ao final do período considerado. Será também discutido de que forma a introdução de mais recursos humanos e robóticos pode afetar os resultados.

### 5.3. Linha de montagem com dois robôs Vs linha de montagem com um robô partilhado

Comparando as instâncias 1 e 2, podemos analisar que embora na primeira exista um robô disponível em cada tarefa e na segunda apenas um, a output da linha permanece inalterado bem como o tempo de ciclo. Podemos concluir que são produzidas 400 unidades em ambas as condições com um tempo de ciclo de 4 U.T. (Figura 5.9, Figura 5.10)

É também importante referir que tanto numa instância como noutra o robô vai executando a tarefa em diferentes instantes de tempo.

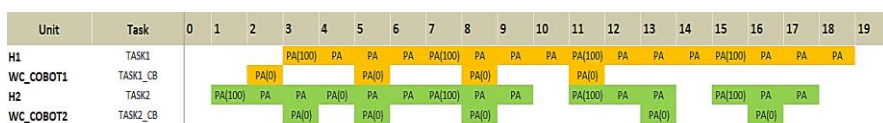


Figura 5.5. escalonamento para a instância 1

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

Código de campo alterado

Formatou: Português (Portugal)

Código de campo alterado

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

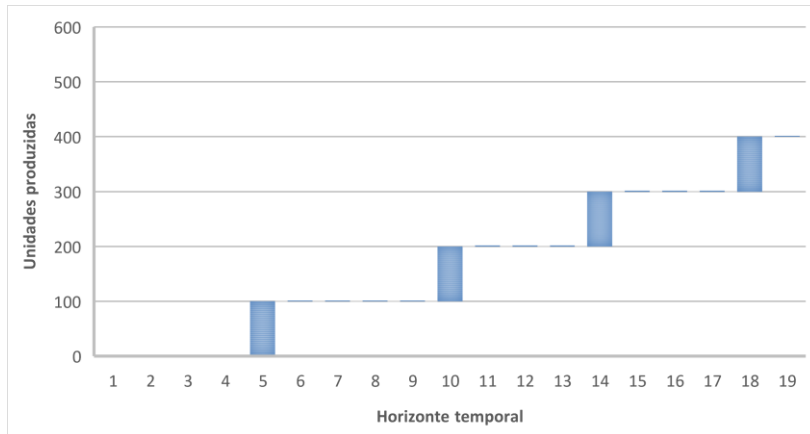


Figura 5.6. taxa de produção da instância 2

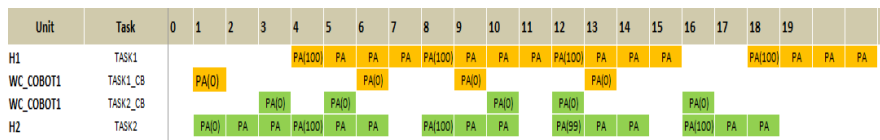


Figura 5.7. escalonamento para a instância 2

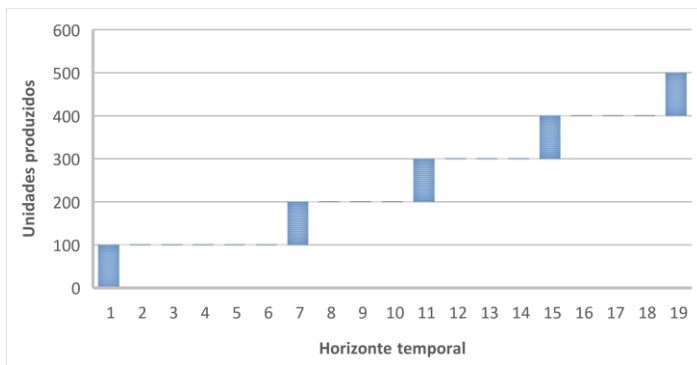


Figura 5.8. taxa de produção da instância 2

## 2.2.

## Discussão de resultados

### DISCUSSAO DE RESULTADOS

### 5.4. Robô sem setup VS robô com setup

Formatou: Não Realce

Ao analisar os resultados apresentados, podemos concluir que para a 2ª instância (robô sem setup) são produzidos 400 unidades. Ao introduzir a distância percorrida por estes e o tempo para mudar a ferramenta (3ª instância) foram produzidas 300 unidades, com um tempo de ciclo de 6 U.T.

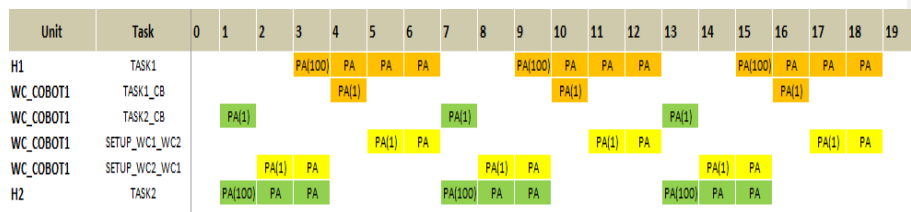


Figura 5.9. escalonamento para a instância 3

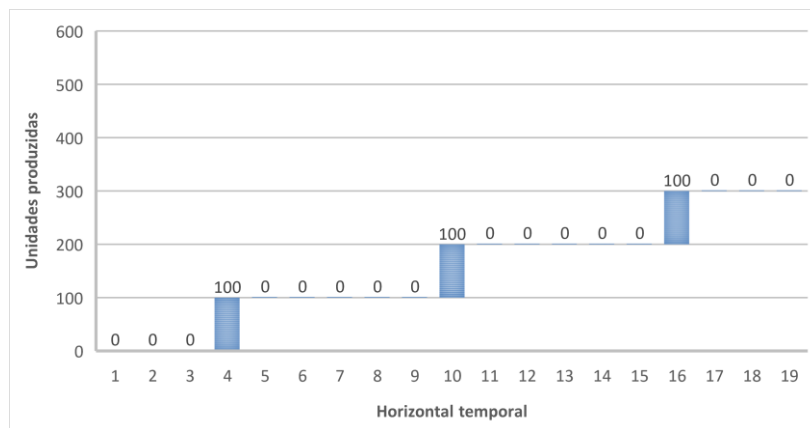


Figura 5.10. Taxa de produção da instância 3

## 5.5. Sumario dos resultados obtidos

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos será apresentado na [Tabela 5.1](#) um resumo dos parâmetros de entrada bem como os resultados mais importantes para todas as instâncias em estudo.

Nesta tabela estará presente, o número de robôs, humanos, a existência ou não de setup, velocidade dos recursos humanos e robóticos. Esta irá conter também informação de quantas unidades do produto A foram produzidas e qual o tempo de ciclo.

**Tabela 5.1.** Resumo dos resultados obtidos (N=NÃO; S=SIM)

Instância	Nº robôs	Nº humanos	Setup	Velocidade robô [m/s]	Unidades produzidas	Tempo de ciclo (U.T.)
1	2	2	N	---	400	4
2	1	2	N	---	400	4
3	1	2	S	0,5	300	6

## 5.6. Taxa de utilização dos equipamentos

Para melhor compreensão das vantagens deste estudo, irá ser analisada a taxa de utilização dos equipamentos de forma a demonstrar que com a sua deslocação para outros postos de trabalho pode ser vantajoso.

Para calcular esse valor será utilizado o número de intervalos de tempo que os diversos equipamentos estão a ser utilizados sobre o tempo total considerado. Nas [Figura 5.11](#) e 5.12, são apresentados dois gráficos de barras, um com a taxa de utilização dos recursos humanos e outros com o recursos robóticos nas várias instâncias em estudo, respetivamente.

$$\text{Taxa de utilização (\%)} = \frac{\text{nº de intervalos de tempo utilizados pelo equipamento}}{\text{nº de intervalos de tempo total}} * 100 \quad (5.1)$$

**Formatou:** Tipo de letra: Times New Roman, Português (Portugal)



## 2.2.

## Discussão de resultados

### DISCUSSAO DE RESULTADOS

Na Figura 5.11 é possível avaliar a taxa de utilização dos humanos em cada instância, onde se conclui que da primeira instância para a segunda a taxa de utilização não altera, no entanto para a terceira instância uma vez que a taxa de produção diminui devido á inserção de tempos de setup, o tempo que estes estão ocupados também será afetado. Nota-se uma diferença entre o humano 1 e o humanos dois porque a tarefa que o humano 1 executa tem uma maior duração que a do humano 2.

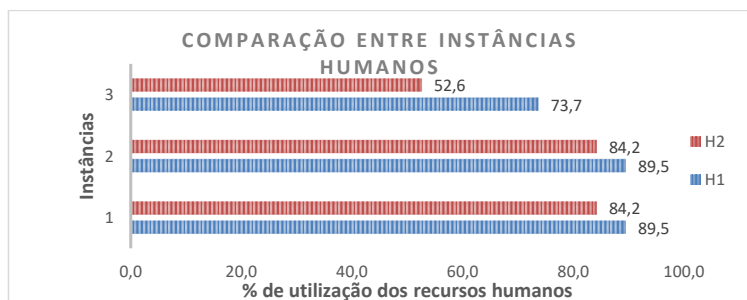


Figura 5.11. Taxa de utilização dos recursos humanos

Com a Figura 5.12, a análise é semelhante, no entanto, são analisadas as taxas de utilização dos recursos robóticos. É de fácil conclusão que quando o número de robôs passa de 1 por cada tarefa para 1 para as 2 tarefas a sua taxa de utilização duplica. Mas como foi explicado anteriormente é necessário considerar o tempo que este demora a deslocar-se entre WC. Quando esse parâmetro entre em consideração embora a taxa de produção caia, a taxa de utilização do robô escala para a totalidade do tempo ocupado.

Comentado [SM38]: Falta explicar este gráfico

Formatou: Tipo de letra: Negrito, Português (Portugal)

Formatada: Normal

Formatada: Avanço: Primeira linha: 2 cm, Espaçamento entre linhas: 1,5 linhas

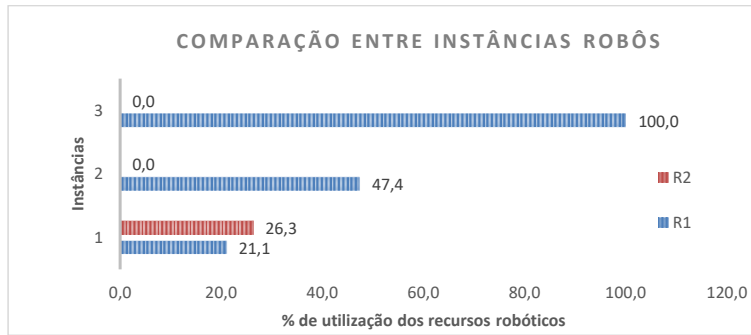


Figura 5.12. Taxa de utilização dos recursos robóticos.

Formatada: Normal, Justificado, Avanço: Primeira linha: 0,75 cm, Espaçamento entre linhas: 1,5 linhas

Comentado [SM39]: Falta explicar este gráfico

## 6. CONCLUSÕES

Eficiência na linha de montagem cada vez mais tem um caráter mais determinante no sucesso e na capacidade de competir das entidades empresariais. Com isto em vista torna-se mandatário a necessidade de desenvolver ferramentas e metodologias que tornem este objetivo mais acessível e aplicável pelas empresas.

Nesta dissertação, o principal foco esteve no desenvolvimento de uma metodologia que ajudasse na tomada de decisões no que diz respeito ao escalonamento da produção.

Este estudo, permitiu responder às questões propostas nos objetivos e conclui que com a introdução da variável de *setup* no sistema, esta contendo fatores como distância entre postos de trabalho e velocidade do robô a produção diminui. Também quanto mais tarefas são introduzidas na linha de montagem, mais a produção diminui.

Por fim, um fator muito importante nesta metodologia desenvolvida é a facilidade com os dados de entrada podem ser rapidamente alterados e adquiridos resultados num curto espaço de tempo, permitindo assim ao gestor contruir o escalonamento da produção de forma rápida e eficiente.

### 6.1. Trabalhos futuros

Embora os resultados sejam satisfatórios, só foram testadas algumas possibilidades sendo por isso importante a criação de mais instâncias que possam analisar outros fatores que não foram analisados aqui.

Também seria interessante aplicar este modelo a um caso de estudo real, entrando com variáveis de custos. Por exemplo, custo de encomenda, custo de aquisição e manutenção dos recursos robóticos.

Se for considerado este tipo de fatores possivelmente a ideia de dividir os recursos por diversos postos de trabalho ficará bastante mais apelativa.

Como foi referido, aplicar esta metodologia para obtenção do escalonamento de produção, precisa de ser aplicada em vários cenários, para permitir que esta técnica seja aplicada na maioria da indústria da manufatura.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.Mauderli, and D.W.T.Rippin. 1979. "Production Planning and Scheduling for Multi-Purpose Batch Chemical Plants."
- Abdi, M. R., and A. W. Labib. 2003. "A Design Strategy for Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs) Using Analytical Hierarchical Process (AHP): A Case Study."
- Barbosa-Póvoa, Ana Paula. 2007. "A Critical Review on the Design and Retrofit of Batch Plants." *Computers and Chemical Engineering* 31 (7): 833–55.  
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.08.003>.
- Boysen, Nils, Malte Fliedner, and Armin Scholl. 2007. "A Classification of Assembly Line Balancing Problems." *European Journal of Operational Research* 183 (2): 674–93.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010>.
- C., Rapacoulias, N. Shah, and C.C. Pantelides. 1991. "Optimal Scheduling of Order-Driven Batch Chemical Plants."
- Casalino, Andrea, Filippo Cividini, Andrea Maria Zanchettin, Luigi Piroddi, and Paolo Rocco. 2018. "Human-Robot Collaborative Assembly: A Use-Case Application." *IFAC-PapersOnLine* 51 (11): 194–99. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.257>.
- Gelders, Ludo F., and Luk N. VAN Wassenhove. 1981. "Production Planning : A Review" 7: 101–10.
- Ghosh, Soumen, and Roger J. Gagnon. 1989. *A Comprehensive Literature Review and Analysis of the Design, Balancing and Scheduling of Assembly Systems. International Journal of Production Research*. Vol. 27.  
<https://doi.org/10.1080/00207548908942574>.
- Graves, Stephen C. 1981. "A Review of Production Scheduling," no. September 2014.
- H.S.Wellons, and G.V.Reklaitis. 1989. "The Design of Multiproduct Batch Plants under Uncertainty with Staged Expansion."
- Hopp, Wallace J., and Mark L. Spearman. 1996. *Factory Physics*.
- IBM. 2019. "CPLEX Optimizer." [Abril. 2019. https://www.ibm.com/analytics/cplex-](https://www.ibm.com/analytics/cplex-)

Código de campo alterado

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

optimizer.

Kempf, Karl G., Pinar Keskinocak, and Reha Uzsoy. 2011. *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise*.

Kochhar, J. S., and S. S. Heragu. 1999. "Facility Layout Design in a Changing Environment." *International Journal of Production Research* 37 (11): 2429–46. <https://doi.org/10.1080/002075499190590>.

Krüger, J., T. K. Lien, and A. Verl. 2009. "Cooperation of Human and Machines in Assembly Lines." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2): 628–46. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.009>.

Lien, T. K. 2001. "Hybrid Automatic-Manual Assembly Systems." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50 (1): 21–24. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62062-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62062-9).

Lippi, Martina, and Alessandro Marino. 2018. "Safety in Human-Multi Robot Collaborative Scenarios: A Trajectory Scaling Approach." *IFAC-PapersOnLine* 51 (22): 190–96. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.540>.

Formatou: Português (Portugal)

Little, J.D., et al. 1963. "An Algorithm for the Traveling Salesman Problem." *Operations Research*, 11, 972–89.

Maganha, Isabela, and Cristóvão Silva. 2017. "A Theoretical Background for the Reconfigurable Layout Problem." *Procedia Manufacturing* 11 (June): 2025–33. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.354>.

Makrini, Ilias El, Kelly Merckaert, Dirk Lefeber, and Bram Vanderborgh. 2017. "Design of a Collaborative Architecture for Human-Robot Assembly Tasks," 1624–29.

Mehrabi, M. G., A. G. Ulsoy, and Y. Koren. 2000. "Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing." *Journal of Intelligent Manufacturing* 11 (4): 403–19. <https://doi.org/10.1023/A:1008930403506>.

Méndez, Carlos A., Jaime Cerdá, Ignacio E. Grossmann, Iiro Harjunkoski, and Marco Fahl. 2006. "State-of-the-Art Review of Optimization Methods for Short-Term Scheduling of Batch Processes." *Computers and Chemical Engineering* 30 (6–7): 913–46. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.02.008>.

Meng, G., S. S. Heragu, and H. Zijm. 2004. "Reconfigurable Layout Problem."

Formatou: Português (Portugal)

Moniz, Samuel, Ana Paula Barbosa-po, Jorge Pinho De Sousa, and Pedro Duarte. 2014. "Solution Methodology for Scheduling Problems in Batch Plants."

<https://doi.org/10.1021/ie403129y>.

Moniz, Samuel, Ana Paula Barbosa-Póvoa, and Jorge Pinho De Sousa. 2013. "New General Discrete-Time Scheduling Model for Multipurpose Batch Plants." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 52 (48): 17206–20.

<https://doi.org/10.1021/ie4021073>.

Nikolakis, Nikolaos, Niki Kousi, George Michalos, and Sotiris Makris. 2018. "Dynamic Scheduling of Shared Human-Robot Manufacturing Operations." *Procedia CIRP* 72: 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.007>.

Pantelides. 1994. "Unified Frameworks for Optimal Process Planning and Scheduling."

Pereira, Luis. 2018. "Optimization and Simulation of Manufacturing Systems Mestrado Integrado Em Engenharia Electrotécnica e de Computadores."

Phanden, Rakesh Kumar, Ajai Jain, and Rajiv Verma. 2011. "Integration of Process Planning and Scheduling: A State-of-the-Art Review." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 24 (6): 517–34.

<https://doi.org/10.1080/0951192X.2011.562543>.

Realyvásquez-Vargas, Arturo, Karina Cecilia Arredondo-Soto, Jorge Luis García-Alcaraz, Bogart Yail Márquez-Lobato, and Jesrael Cruz-García. 2019. "Introduction and Configuration of a Collaborative Robot in an Assembly Task as a Means to Decrease Occupational Risks and Increase Efficiency in a Manufacturing Company." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 57 (October 2018): 315–28.

<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.015>.

Reklaitis, G. V. 1995. "Scheduling Approaches for the Batch Process Industries." *ISA Transactions* 34 (4): 349–58. [https://doi.org/10.1016/0019-0578\(95\)00032-1](https://doi.org/10.1016/0019-0578(95)00032-1).

Roldão, Victor Sequeira, and Joaquim Silva Ribeiro. 2014. *Gestão Das Operações - Uma Abordagem Integrada*.

Subrahmanyam, Sriram, Matthew H. Bassett, Joseph F. Pekny, and Gintaras V. Reklaitis. 1995. "Issues in Solving Large Scale Planning, Design and Scheduling Problems in Batch Chemical Plants." *Computers and Chemical Engineering* 19 (SUPPL. 1): 577–82. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(95\)87097-0](https://doi.org/10.1016/0098-1354(95)87097-0).

Taylor, Publisher, Joel P Stinson, Edward W Davis, Basheer M Khumawala, and Edward W Davis. 2013. "Multiple Resource- -Constrained Scheduling Using Branch and Bound," no. September 2013: 37–41.

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

Formatou: Português (Portugal)

- Wassick, John M., and Jeff Ferrio. 2011. "Extending the Resource Task Network for Industrial Applications." *Computers and Chemical Engineering* 35 (10): 2124–40. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.01.010>.
- Wellons, Michael C., and Gintaras V. Reklaitis. 1991. "Scheduling of Multipurpose Batch Chemical Plants. 2. Multiple-Product Campaign Formation and Production Planning."



**Formatada:** Anexos Apêndices, Avanço: Esquerda: 2,64 cm