



# ESTUDO COMPARATIVO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA COM BASE NA SIMULAÇÃO

BRUNO MIGUEL ARAÚJO LOPES

novembro de 2021

## **ESTUDO COMPARATIVO DOS MECANISMOS POLCA E RF- POLCA COM BASE NA SIMULAÇÃO**

Bruno Miguel Araújo Lopes  
1140715

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica – Ramo Gestão Industrial, realizada sob a orientação do Prof. Doutor Luís Pinto Ferreira e coorientação do Prof. Doutor Nuno Octávio Fernandes.

**2020/2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Professor Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira

Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Coorientador**

Professor Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Castelo Branco

## **Arguente**

Professor Doutor Cristóvão Silva

Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira do Instituto Superior de Engenharia do Porto e ao Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes do Instituto Politécnico de Castelo Branco pela orientação e por todo o tempo despendido na passagem de conhecimentos, sem os quais este trabalho não teria sido possível.

Aos meus pais, namorada e restante família pelo apoio incondicional que me deram e dão e por terem estado sempre ao meu lado durante este percurso.

E agradeço aos amigos que fiz ao longo do meu percurso académico.

A todos o meu obrigado.



## PALAVRAS-CHAVE

POLCA; RF-POLCA; Controlo da produção; Simulação de eventos discretos

## RESUMO

O POLCA (*Paired-Cells Overlapping Loops of Cards with Authorization*) é um mecanismo visual, i.e., baseado em cartões, para o controlo da produção e do fluxo de materiais no espaço fabril. Este atua de forma a reduzir os prazos de produção e a cumprir com as datas de entrega acordadas com os clientes, sendo particularmente apropriado para a produção de elevada variedade de produtos em pequenas quantidades.

Recentemente foi proposta uma alternativa ao POLCA designada de *Release-and-Flow* POLCA (RF-POLCA). Corresponde a uma versão simplificada do POLCA, portanto, mais fácil de implementar na prática, usando datas de autorização apenas na primeira célula que o trabalho visita. Esta versão do POLCA tem sido adotada com sucesso por algumas empresas. Contudo, é referido como sendo apropriada apenas em determinadas situações produtivas de trabalhos com rotas curtas e idênticas, baixa variabilidade em termos da carga que os trabalhos impõem nas células onde são processados e poucas interseções entre os *loops* POLCA.

Ainda que o POLCA tenha sido largamente estudado na literatura, o desempenho do RF-POLCA permanece largamente desconhecido. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é o de estudar o comportamento do mecanismo RF-POLCA comparando-o com o POLCA, em diferentes ambientes produtivos, procurando analisar o impacto das condições produtivas acima mencionadas potencialmente limitadoras da sua aplicação.

O estudo é levado a cabo usando a simulação de eventos discretos. Os resultados obtidos permitem-nos concluir que o RF-POLCA é a melhor opção em sistemas de produção com configuração divergente ou configuração convergente, em que os produtos têm rotas curtas. Com rotas longas associadas aos produtos, o mecanismo POLCA obtém melhor desempenho. Nos sistemas de produção com uma configuração em linha (i.e., *flow shop*), o RF-POLCA desempenha melhor que o POLCA independentemente da dimensão da rota dos produtos.



**KEYWORDS**

*POLCA; RF-POLCA; Production control; Discrete event simulation*

**ABSTRACT**

*POLCA (Paired-Cells Overlapping Loops of Cards with Authorization) is a visual mechanism, based on cards, for controlling the production and flow of materials in the manufacturing shop floor. This works in order to reduce production lead times and comply with the delivery dates agreed with customers, being particularly suitable for the production of a high mix of products in small quantities.*

*Recently, an alternative to the POLCA mechanism called Release-and-Flow POLCA (RF-POLCA) has been proposed. It corresponds to a simplified version of POLCA, therefore, easier to implement in practice, which uses authorization dates only in the first cell that the job visits. This version of POLCA has been successfully adopted by some companies. However, it is said to be appropriate only in certain manufacturing situations with short and identical routes, low variability for the workload jobs impose in cells and low intersections between POLCA loops.*

*Although POLCA has been extensively studied in the literature, the performance of RF-POLCA remains unknown. In this sense, the objective of this work is to study the behavior of the RF-POLCA mechanism, comparing it with POLCA, in different manufacturing environments, analyzing the impact of the productive conditions mentioned above that can potentially limit his application.*

*The study is carried out using discrete event simulation. The results allowed us to conclude that the RF-POLCA is the best option for divergent and convergent configurations with short routes. With longer routes, it is the POLCA mechanism that gets the best performance. In the flow shop configuration, RF-POLCA performs better than POLCA for both, short and longer routes.*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

| Termo    | Designação  |
|----------|---|
| AD       | <i>Authorization Date</i>   |
| CV       | Coeficiente de Variação   |
| DD       | <i>Due Date</i>   |
| FCFS     | <i>First-Come First-Serve</i>                                     |
| POLCA    | <i>Paired-cells Overlapping Loops of Cards with Authorization</i> |
| QRM      | <i>Quick Response Manufacturing</i>                               |
| RF-POLCA | <i>Release-and-Flow POLCA</i>                                     |
| TBC      | <i>Time-Based Competition</i>                                     |
| TP       | Tempo de Processamento  |
| WIP      | <i>Work-in-Process</i>  |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1 – EXPLOSÃO DOS NÍVEIS DE WIP NO CONTROLO DO FLUXO DE MATERIAIS UTILIZANDO O KANBAN - ADAPTADO DE SURI (2003).....  | 8  |
| FIGURA 2 - EXEMPLO DE UM CARTÃO POLCA - RETIRADO DE (KRISHNAMURTHY & SURI, 2009) .....  | 9  |
| FIGURA 3 - EXEMPLO DE CICLOS SOBREPOSTOS NO POLCA – RETIRADO DE (SURI, 2018).....   | 10 |
| FIGURA 4 - EXEMPLO DE UMA LISTA DE AUTORIZAÇÃO - ADAPTADO DE SURI (2018) .....  | 11 |
| FIGURA 5 – COMPARAÇÃO DAS DATAS DE AUTORIZAÇÃO ENTRE O POLCA E O RF-POLCA - ADAPTADO DE SURI (2018) .....   | 11 |
| FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO COM CONFIGURAÇÃO EM LINHA.....   | 24 |
| FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO COM CONFIGURAÇÃO DIVERGENTE .....  | 24 |
| FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO COM CONFIGURAÇÃO CONVERGENTE ...   | 25 |
| FIGURA 9 - CHEGADA E LANÇAMENTO .....   | 28 |
| FIGURA 10 - BLOCO DE CRIAÇÃO DOS TRABALHOS .....  | 30 |
| FIGURA 11 - <i>SUBMODEL</i> PARA A DEFINIÇÃO DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO EM CADA CÉLULA E ATRIBUIÇÃO DE ROTAS .....   | 30 |
| FIGURA 12 - CRIAÇÃO DA DATA DE ENTRADA, DD, <i>LEAD TIMES</i> INICIAIS E AD .....   | 31 |
| FIGURA 13 - VERIFICAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DOS CARTÕES POLCA (QUANTUM EM UNIDADES).....   | 31 |
| FIGURA 14 - VERIFICAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DOS CARTÕES POLCA (QUANTUM EM HORAS) .....   | 31 |
| FIGURA 15 - CONDIÇÕES DE ATRIBUIÇÃO DO CARTÃO POLCA (QUANTUM EM UNIDADES) E CRIAÇÃO DA DATA DE LANÇAMENTO EM PRODUÇÃO.....  | 32 |
| FIGURA 16 - CONDIÇÕES DE ATRIBUIÇÃO DO CARTÃO POLCA (QUANTUM EM HORAS) E CRIAÇÃO DA DATA DE LANÇAMENTO EM PRODUÇÃO.....   | 32 |
| FIGURA 17 - CÉLULA DE TRABALHO DO MODELO .....  | 32 |
| FIGURA 18 - CRIAÇÃO DA AD E DO ATRIBUTO "ESPERA" PARA A CÉLULA DE TRABALHO .....  | 33 |
| FIGURA 19 - PROCESSAMENTO DO TRABALHO E REGISTO DO TEMPO DE PERCURSO NA CÉLULA.....   | 33 |
| FIGURA 20 - REMOÇÃO DO CARTÃO POLCA APÓS A OPERAÇÃO NA CÉLULA (QUANTUM EM UNIDADES) .....   | 33 |
| FIGURA 21 - REMOÇÃO DO CARTÃO POLCA APÓS A OPERAÇÃO NA CÉLULA (QUANTUM EM HORAS) ....   | 34 |
| FIGURA 22 - SINAL DE CARTÃO LIBERTADO .....   | 34 |
| FIGURA 23 - BLOCOS USADOS PARA AS MEDIDAS DE DESEMPENHO .....   | 34 |
| FIGURA 24 - REGISTO DE ATRASADOS E NÃO-ATRASADOS.....   | 34 |
| FIGURA 25 - REGISTO DE ATRASOS, EM HORAS .....  | 35 |
| FIGURA 26 - REGISTO DO TTT E TT .....   | 35 |
| FIGURA 27 - REGISTO DO TARDINESS.....   | 35 |
| FIGURA 28 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NA CONFIGURAÇÃO EM LINHA COM TRÊS ESTÁGIOS, QUANTUM EM UNIDADES, COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA) .....  | 39 |
| FIGURA 29 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NA CONFIGURAÇÃO EM LINHA COM TRÊS ESTÁGIOS, QUANTUM EM HORAS, COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA) ..        | 40 |
| FIGURA 30 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NA CONFIGURAÇÃO EM LINHA COM CINCO ESTÁGIOS, QUANTUM EM UNIDADES, COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA) ..... | 42 |
| FIGURA 31 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NA CONFIGURAÇÃO EM LINHA COM CINCO ESTÁGIOS, QUANTUM EM HORAS COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA) ..        | 43 |
| FIGURA 32 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NUM MODELO CONVERGENTE COM TRÊS ESTÁGIOS, QUANTUM EM UNIDADES COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA) .....     | 44 |
| FIGURA 33 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NUM MODELO CONVERGENTE COM TRÊS ESTÁGIOS, QUANTUM EM HORAS COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA) ..           | 45 |
| FIGURA 34 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NUM MODELO CONVERGENTE COM CINCO ESTÁGIOS, QUANTUM EM UNIDADES COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA) .....    | 46 |

---

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 35 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NUM MODELO CONVERGENTE COM CINCO ESTÁGIOS, QUANTUM EM HORAS COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA)   | 47 |
| FIGURA 36 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NUM MODELO DIVERGENTE COM TRÊS ESTÁGIOS, QUANTUM EM UNIDADES COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA)  | 48 |
| FIGURA 37 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NUM MODELO DIVERGENTE COM TRÊS ESTÁGIOS, QUANTUM EM HORAS COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA)     | 49 |
| FIGURA 38 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NUM MODELO DIVERGENTE COM CINCO ESTÁGIOS, QUANTUM EM UNIDADES COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA) | 51 |
| FIGURA 39 - DESEMPENHO DOS MECANISMOS POLCA E RF-POLCA NUM MODELO DIVERGENTE COM CINCO ESTÁGIOS, QUANTUM EM HORAS COM $CV^2 = 0,5$ (À ESQUERDA) E $CV^2 = 0,707$ (À DIREITA)    | 52 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| TABELA 1 - ESTUDOS TEÓRICOS NO ÂMBITO DO POLCA .....   | 13 |
| TABELA 2 - IMPLEMENTAÇÕES PRÁTICAS DO POLCA.....   | 16 |
| TABELA 3 - IMPLEMENTAÇÕES PRÁTICAS DO RF-POLCA.....  | 18 |
| TABELA 4 - COMPARAÇÃO DO POLCA COM OUTROS MECANISMOS DE CONTROLO DA PRODUÇÃO E DO<br>FLUXO DE MATERIAIS..... | 19 |
| TABELA 5 - FATORES DE EXPERIMENTAÇÃO E NÍVEIS DE ESTUDO .....  | 23 |



# ÍNDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | INTRODUÇÃO .....  | 1  |
| 1.1   | Enquadramento do trabalho.....                                | 1  |
| 1.2   | Metodologia e Objetivos do Trabalho .....                     | 2  |
| 1.3   | Conteúdo e estrutura da dissertação.....                      | 3  |
| 2.    | REVISÃO DA LITERATURA.....                                    | 7  |
| 2.1   | Quick Response Manufacturing .....                            | 7  |
| 2.2   | POLCA.....  | 8  |
| 2.3   | RF-POLCA.....   | 11 |
| 2.4   | Estudos realizados no âmbito do POLCA e RF-POLCA.....         | 12 |
| 3.    | ESTUDO DE SIMULAÇÃO .....                                     | 23 |
| 3.1   | Plano Experimental .....                                      | 23 |
| 3.2   | Pressupostos considerados.....                                | 26 |
| 3.3   | Medidas de Desempenho .....                                   | 28 |
| 3.4   | Modelo de Simulação.....                                      | 28 |
| 4.    | RESULTADOS E ANÁLISE.....                                     | 38 |
| 4.1   | Configuração em linha .....                                   | 39 |
| 4.1.1 | Influência da variabilidade dos tempos de processamento ..... | 39 |
| 4.1.2 | Influência do número de células na rota dos trabalhos .....   | 41 |
| 4.2   | Configuração Convergente.....                                 | 43 |
| 4.2.1 | Influência da variabilidade dos tempos de processamento ..... | 43 |
| 4.2.2 | Influência do número de células na rota dos trabalhos .....   | 45 |
| 4.3   | Configuração Divergente.....                                  | 48 |
| 4.3.1 | Influência da variabilidade nos tempos de processamento ..... | 48 |
| 4.3.2 | Influência do número de células na rota dos trabalhos .....   | 50 |
| 5.    | CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....             | 55 |
| 5.1   | Conclusões .....  | 55 |
| 5.2   | Propostas de trabalhos futuros.....                           | 56 |

---

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... | 59 |
| APÊNDICE.....                    | 65 |

# 1. INTRODUÇÃO

- 1.1 Enquadramento do trabalho
- 1.2 Metodologia e Objetivos do trabalho
- 1.3 Conteúdo e estrutura da dissertação

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do trabalho

Esta dissertação surge como uma proposta de estudo comparativo entre os mecanismos POLCA (*Paired-Cells Overlapping Loops of Cards with Authorization*) e RF-POLCA (*Release-and-Flow POLCA*). O POLCA foi introduzido em 1998 por Rajan Suri como um mecanismo de controlo da produção e do fluxo de materiais no espaço fabril. Este atua de forma a reduzir os prazos de produção e a cumprir com as datas de entrega acordadas com os clientes, sendo particularmente apropriado para a produção de elevada variedade de produtos em pequenas quantidades.

Os mecanismos de controlo de produção, como o POLCA e o RF-POLCA, controlam o lançamento em produção e o fluxo de trabalhos no espaço fabril. Estes mecanismos são um elemento chave para a eficácia dos sistemas de produção (Bagni et al., 2020). Segundo Fernandes & Carmo-Silva (2006) o lançamento em produção (*order release*) determina o momento e as ordens de produção ou trabalhos a serem lançados em produção.

A seleção de trabalhos para lançamento baseia-se, geralmente, na sua urgência, disponibilidade de materiais para se iniciar a sua produção e na situação atual em que se encontra o espaço fabril, nomeadamente em termos de trabalhos em processamento (i.e., WIP). O controlo do fluxo de materiais coordena o fluxo de trabalhos através dos diversos centros de trabalho. Este controlo envolve essencialmente a ativação do centro de trabalho, isto é, o início do processamento do trabalho assim que os materiais estiverem disponíveis e a tomada de decisão relativamente à seleção do trabalho para processamento, dos que se encontram em fila de espera. Em alguns mecanismos, a disponibilidade de materiais é suficiente para iniciar a produção, mas noutros, como o POLCA e o RF-POLCA, autorizações de produção sob a forma de cartões são requeridas. Regras de despacho (*dispatching rules*) são geralmente usadas para determinar qual dos trabalhos que se encontra em fila de espera deve ser processado, sempre que o centro de trabalho fica disponível.

Os principais objetivos associados aos mecanismos de controlo da produção devem incluir não só a redução de WIP e dos custos associados à posse de stock, dos tempos de percurso e das datas entrega dos trabalhos, mas também devem assegurar a entrega atempada ao cliente (Stevenson et al., 2005). Estes são objetivos importantes, pelo que a seleção do mecanismo de controlo de produção a adotar é uma decisão estratégica crucial.

Diversos mecanismos de controlo da produção baseados em cartões têm sido propostos na literatura, tais como o Kanban proposto por Taiichi Ohno (Sugimori, 1977), o POLCA (Suri 1998), o CONWIP (Spearman et. al. 1990) e o COBACABANA (Land 2009). Estes podem adotar uma abordagem *push*, *pull* ou híbrida ao controlo da produção e do fluxo de materiais. Segundo Hopp & Spearman (2004) os mecanismos *pull* limitam e controlam a quantidade de trabalho em curso de fabrico (WIP), enquanto nos mecanismos *push* controlam o início de processamento dos trabalhos, definindo datas de lançamento em produção. O POLCA e RF-POLCA podem ser vistos como abordagens híbridas ao controlo da produção, uma vez que combinam datas de autorização geradas por um sistema MRP de elevado nível, elemento *push*, com autorizações de produção baseados em cartões, elemento *pull*.

O POLCA tem sido largamente estudado na literatura por autores como Fernandes et al. (2020), Thüerer, et al. (2020), Krishnamurthy & Suri (2009), Riezebos (2010), entre outros. O RF-POLCA, pelo contrário, foi recentemente proposto por Suri (2018), contudo o seu desempenho permanece largamente desconhecido. Segundo este autor, o RF-POLCA pode ser uma boa alternativa ao POLCA, particularmente em Pequenas e Médias Empresas (PMEs) no setor de produção por encomenda (*make-to-order* ou *engineering-to-order*), por ser mais simples de implementar. Contudo, Suri considera como requisitos para a sua implementação que os produtos possuam pequenas rotas (em termos do número de células a visitar para o seu processamento), que o *mix* de produtos seja reduzido, que as rotas dos produtos não resultem em demasiadas interseções entre os *loops* POLCA e que não ocorram alterações frequentes na data de entrega dos trabalhos durante a sua execução.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho passa por estudar o comportamento do RF-POLCA, comparando-o com o POLCA em diferentes ambientes produtivos, procurando analisar o impacto dos pressupostos acima mencionados para a implementação do RF-POLCA, tendo-se para tal sido definida a seguinte questão de investigação:

Sendo o RF-POLCA uma abordagem ao controlo da produção mais simples que o POLCA, em que situações produtivas pode este ser adotado?

Considerando que na generalidade dos casos a ocorrência de alterações na data de entrega dos trabalhos durante a sua execução é menos provável, uma vez que iniciada a produção alterações deixam de ser possíveis, o estudo centra-se nos restantes três pressupostos.

## 1.2 Metodologia e Objetivos do Trabalho

Este trabalho incide sobre o estudo comparativo dos mecanismos POLCA e RF-POLCA em ambientes de produção dinâmicos, i.e., em que a chegada de trabalhos ou ordens de produção ocorre ao longo do tempo e estocásticos, i.e., em que existe variabilidade associados à procura e aos tempos de processamento dos trabalhos nos diversos centros de trabalho.

Para tal, foram definidos como principais objetivos do trabalho:

- O estudo comparativo do comportamento dos mecanismos RF-POLCA e POLCA em diferentes ambientes de produção por encomenda;
- A definição de diretrizes relativamente à forma como o mecanismo RF-POLCA desempenha, que possam ser usadas para a sua implementação na prática industrial;

Dada a complexidade dos sistemas produtivos em causa não é possível usar modelos matemáticos analíticos, pelo que se recorre à simulação de eventos discretos, para a modelação destes sistemas e dos mecanismos RF-POLCA e POLCA de controlo da produção. Assim a metodologia adotada para a realização deste trabalho é a metodologia de simulação e o *software* de simulação usado é o Arena da *Rockwell Automation, Inc.* Segundo Banks et al. (2005), a simulação fornece um ambiente para estudar o comportamento dinâmico de um sistema sob diferentes condições de utilização, usando um modelo para o representar. A simulação pode ser usada como ferramenta de análise para prever o efeito das mudanças nos sistemas e como ferramenta de design para prever o desempenho de novos sistemas (Banks et al., 2005); (Ferreira et al., 2010);(Ferreira et al., 2011);(Ferreira et al., 2012a);(Ferreira et al., 2012b);(Ferreira et al., 2012c);(Ferreira et al., 2013);(Ferreira et al., 2017);(Silva et al., 2021).

### 1.3 Conteúdo e estrutura da dissertação

O presente relatório está estruturado em cinco capítulos. Os próximos capítulos encontram-se organizados da seguinte forma:

No segundo capítulo é realizada uma revisão da literatura, procurando por um lado identificar a forma como os mecanismos POLCA e RF-POLCA operam e por outro identificar estudos comparativos e implementações práticas que tenham sido levadas a cabo e os resultados obtidos;

No terceiro capítulo apresenta-se o modelo de simulação desenvolvido para o estudo destes mecanismos, o plano experimental e as medidas de desempenho consideradas;

No quarto capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos para os diversos cenários experimentais considerados;

No quinto capítulo identificam-se as principais conclusões do estudo e potenciais implicações práticas e são elaboradas propostas de trabalhos futuros.

No fim são apresentadas as referências bibliográficas e o apêndice do trabalho.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 *Quick Response Manufacturing*

2.2 POLCA

2.3 RF-POLCA

2.4 Estudos realizados no âmbito do POLCA e RF-POLCA



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre as diferentes abordagens ao controlo da produção e do fluxo de materiais que são relevantes para este trabalho. Para tal a secção 2.1 introduz o conceito de QRM (*Quick Response Manufacturing*). A secção 2.2 introduz o POLCA e os aspetos operacionais do mecanismo. A secção 2.3 apresenta o mecanismo RF-POLCA e explica as diferenças entre este e o mecanismo POLCA. Identifica também pressupostos ao seu funcionamento. Por fim, a secção 2.4 faz uma revisão da literatura no que se refere a estudos realizados relacionados com estes dois mecanismos, implementações práticas e resultados alcançados.

### 2.1 *Quick Response Manufacturing*

As empresas tipicamente escolhem o tipo de abordagem ao controlo da produção e do fluxo de materiais que mais se adequa ao seu tipo de produção, em termos de quantidade e variedade de artigos que produzem. Os dois tipos de produção mais comuns são os seguintes:

- Volume elevado e variedade baixa (*High volume-low variety*)
- Volume baixo e variedade elevada (*Low volume-high variety*)

Na primeira situação, de volume elevado e variedade baixa, a empresa centra a sua produção num número limitado de tipos de produtos, que exigem um conjunto comum de processos de fabrico. Esta situação é conhecida por *mass production*. Na segunda situação, a empresa procura atrair clientes oferecendo várias opções e produtos customizáveis, sendo conhecida como *mass customization*.

No mercado do século 21, muitas empresas estão a utilizar a combinação de *low volume-high variety* como estratégia competitiva. As empresas procuram atrair clientes oferecendo várias opções de um produto ou produtos diversos e devido a isso, a padronização torna-se difícil porque cada cliente terá requisitos diferentes. É neste ambiente que o QRM se torna relevante.

Segundo (Suri, 2003) o QRM foca-se em reduzir o tempo de resposta ao cliente em ambientes de volume de produção baixo e variedade elevada. As raízes desta estratégia podem ser encontradas no *Time-Based Competition* (competição baseada no tempo) conhecida pelo acrónimo TBC. No TBC, a velocidade de produção é utilizada como forma de obter vantagem competitiva (Suri, 1998). O QRM foca-se na redução do *lead time*

(i.e., prazo de produção) procurando reduzir ou eliminar as atividades que não agregam valor, reduzindo o tempo e o custo para o cliente. De seguida são enunciados os princípios do QRM, segundo (Mussons, 2021) em *QRM Institute*:

- Competição baseada no tempo;
- Foco na redução dos prazos de entrega;
- Uso do POLCA para controlar o fluxo de materiais;
- Organização do sistema de produção em células de produção;

O QRM pode ser definido como a criação e produção rápida de produtos personalizados com base na necessidade do cliente (Suri, 2010). Uma forma de o conseguir é através da criação de células de trabalho, próximas entre si, cada uma focada numa das etapas do processo de produção (Krishnamurthy & Suri, 2009). Esta estratégia permite reduzir o tempo de transporte e de manuseio no espaço fabril e, portanto, contribui para reduzir os prazos de entrega e aumentar a velocidade de resposta ao cliente (Fernandes & Carmo-Silva, 2006).

## 2.2 POLCA

O QRM é usado para ganhar vantagem competitiva num ambiente de volume baixo e variedade elevada. As estratégias *pull* tradicionais, como o *Kanban*, têm desvantagens quando se trata de ambientes de produção com volume baixo e alta variedade, levando ao aumento do trabalho em curso de fabrico (*WIP: Work-In-Progress*) (Germs & Riezebos, 2010). A figura 1 ilustra esta explosão de WIP, ao longo das várias operações requeridas pelos produtos.

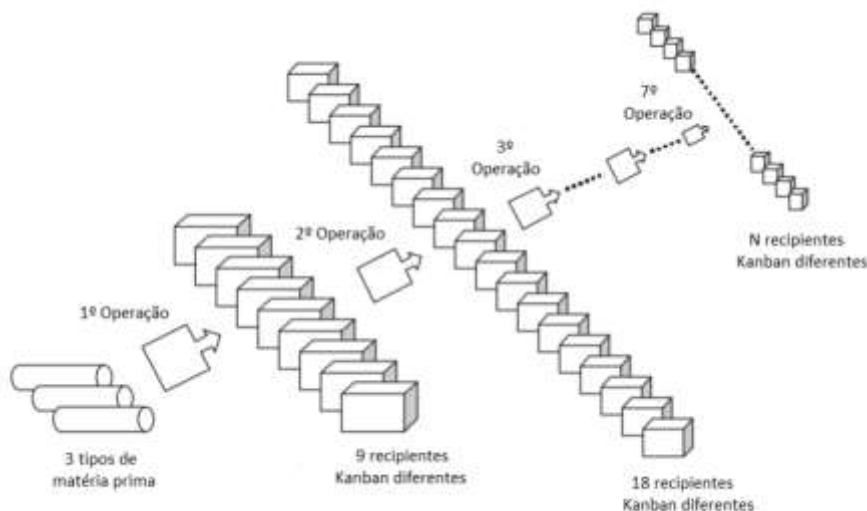


Figura 1 – Explosão dos níveis de WIP no controlo do fluxo de materiais utilizando o Kanban - adaptado de Suri (2003)

Para limitar este problema, Suri introduziu em 1998 um novo mecanismo de controlo da produção e do fluxo de materiais designado de *Paired-cells Overlapping Loops of Cards with Authorization* (POLCA). O POLCA é um mecanismo de controlo visual, baseado em cartões, como ilustrado na figura 2, que controla o fluxo de trabalhos entre células no espaço fabril.

Os cartões POLCA são atribuídos a pares de células consecutivas no roteiro do trabalho, como ilustrado na figura 3. Estes pares de células formam *loops* de controlo onde os cartões circulam. Contrariamente aos cartões *Kanban*, que indicam a necessidade de reposição de stock, os cartões POLCA indicam a disponibilidade da célula a jusante para processar novos trabalhos a serem fornecidos pela célula a montante. Também ao contrário do cartão *Kanban*, o cartão POLCA não é específico de um tipo de trabalho, podendo ser atribuído a qualquer dos trabalhos que aguarda processamento na célula. Isto faz com que o POLCA não conduza à explosão de WIP em ambientes de elevada variedade de produtos.



Figura 2 - Exemplo de um cartão POLCA - retirado de (Krishnamurthy & Suri, 2009)

A figura 3 ilustra um exemplo para o fluxo dos cartões POLCA para um trabalho específico, seguindo a rota será A-B-G. O cartão A/B é alocado na primeira célula do par (i.e., célula A) autorizando a sua produção nesta célula, permanecendo com este até ser processado na segunda célula do par (i.e., célula B). Depois de terminar o seu processamento na célula A, o trabalho aguardará pela disponibilidade do próximo cartão, neste caso o cartão B/G. Um ponto importante a referir é que o cartão A/B continua anexado ao trabalho, sendo anexado um segundo (i.e., cartão B/G), o que irá criar o designado *overlapping*, ou seja, sobreposição de *loops*. Só quando acabar a operação na célula B é que o cartão A/B é removido do trabalho. Ao ser removido do trabalho e enviado de volta para a célula A, o cartão funciona como uma indicação de capacidade disponível na célula B. Ou seja, indica que a célula A poderá enviar um novo trabalho para a célula B. Este processo continua até que todas as operações definidas para a realização do trabalho sejam concluídas. De notar que o trabalho terá um cartão anexado na primeira e na última célula, nas restantes células da sua rota terá dois.

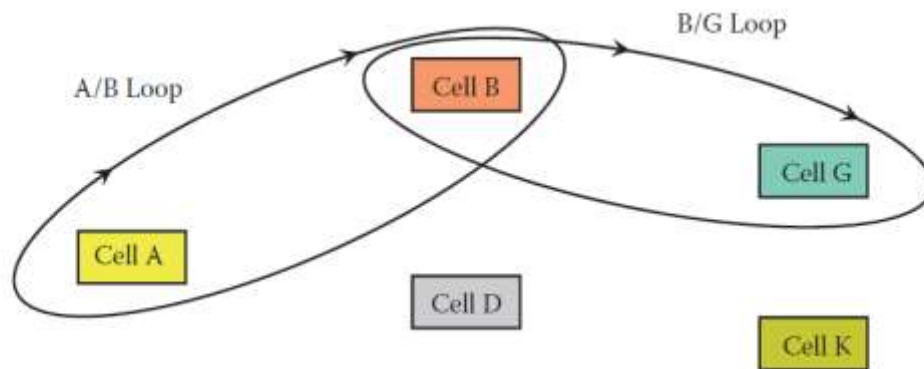


Figura 3 - Exemplo de ciclos sobrepostos no POLCA – retirado de (Suri, 2018)

Contudo, para se iniciar a operação na célula A, e em qualquer outra célula na rota do artigo, além de ser necessário um cartão é também necessário que o material para a operação se encontre disponível e que a data de autorização para início de produção na célula já tenha sido atingida. Para tal é usada uma lista de autorização - *Authorization List*, como ilustrado na figura 4. De acordo com Suri (2018), na tomada de decisão é necessário responder às seguintes questões:

1. O próximo trabalho da lista atingiu a data de autorização?
2. O material para esse trabalho está disponível?
3. O cartão POLCA a alocar ao trabalho está disponível?

Se a resposta às três perguntas for afirmativa, o trabalho é lançado em produção na célula. Se na segunda ou terceira questão a resposta não for afirmativa, a equipa ou o operador volta à primeira questão e seleciona o próximo trabalho da Lista de autorização. Se a resposta à primeira questão não for afirmativa, a célula deve permanecer inativa, e o operador pode ajudar nas células a montante, se possível, ou trabalhar em atividades secundárias.

A Lista de Autorização (figura 4) contém apenas trabalhos que ainda não foram lançados em produção na célula, i.e., que aguardam processamento. Quando o trabalho é lançado, este é removido da lista. A lista está organizada de forma crescente da data de autorização, a qual é determinada por programação regressiva a partir das datas devidas de entrega dos trabalhos. Isto é geralmente feito por um mecanismo MRP de elevado nível, mas outras abordagens podem ser usadas. A data de autorização representa a data ideal para o trabalho iniciar o processamento numa determinada célula. Iniciar antes da data definida pode levar ao uso desnecessário de capacidade, bem como ao acumular de WIP. Por outro lado, começar o trabalho posteriormente à data definida pode levar ao incumprimento da data de entrega acordada com o cliente.

| Lista de Autorização            |                     |                            |                            |
|---------------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|
| Nome da célula: <b>Célula A</b> |                     | Data: <b>15 de Maio</b>    |                            |
| Identificação do Trabalho       | Data de Autorização | Próxima Célula de Trabalho | Data de trabalho adicional |
| R2D2                            | 13 de Maio          | D                          | ...                        |
| C3P0                            | 15 de Maio          | B                          | ...                        |
| NR07                            | 15 de Maio          | D                          | ...                        |
| AK08                            | 16 de Maio          | F                          | ...                        |
| SS28                            | 17 de Maio          | B                          | ...                        |
| ...                             | ...                 | ...                        | ...                        |
| ...                             | ...                 | ...                        | ...                        |

Figura 4 - Exemplo de uma Lista de Autorização - adaptado de Suri (2018)

### 2.3 RF-POLCA

Segundo Suri (2018) o RF-POLCA (*Release and Flow - POLCA*) é uma versão simplificada do mecanismo POLCA, isto porque, a Data de Autorização só é usada na primeira célula que o trabalho tem de visitar. Ao usar este mecanismo, contrariamente ao POLCA, na tomada de decisão nas células seguintes não será necessário verificar as datas de autorização, sendo o fluxo do trabalho controlado apenas pela disponibilidade dos cartões POLCA e de materiais para se iniciar o processamento. Ou seja, nestas células, a tomada de decisão passa a ser baseada unicamente em duas das três questões previamente apresentadas.

A figura 5 compara a tomada de decisão nos mecanismos POLCA e RF-POLCA com base nas datas de autorização.

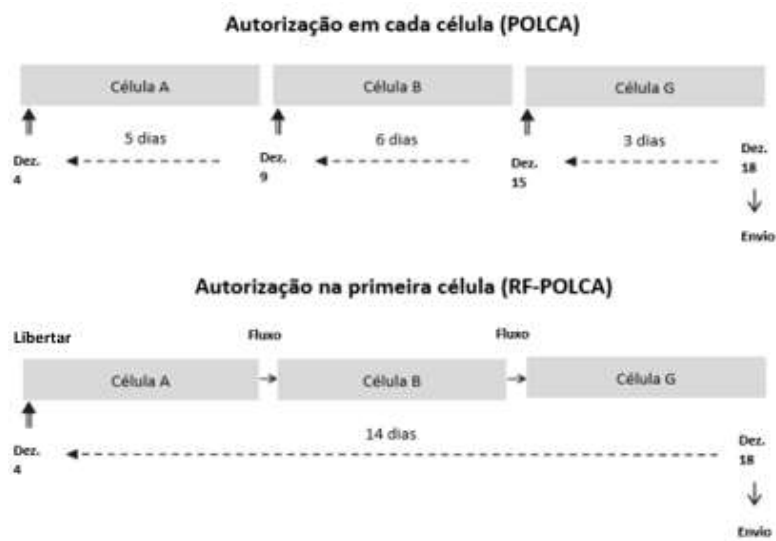


Figura 5 – Comparação das Datas de Autorização entre o POLCA e o RF-POLCA - adaptado de Suri (2018)

Como as células seguintes não utilizam datas de autorização, os trabalhos são processados nestas de acordo com a regra *First-Come First-Serve* (FCFS). O uso desta regra ao nível do despacho é importante para manter consistência, evitando que os trabalhadores escolham os trabalhos, por exemplo, pelo grau de dificuldade (Suri, 2018).

Segundo Suri (2018) o RF-POLCA, uma versão mais simples do POLCA, nem sempre será apropriada, nomeadamente em situações como as seguintes:

- Quando há trabalhos com longas cadeias (*i.e.*, rotas envolvendo a visita a quatro ou mais células). Nestas circunstâncias, a data de lançamento para a célula inicial poderá não ser suficiente, para garantir que os trabalhos terminam na data de entrega devida. Nesse caso a verificação das Datas de Autorização em cada célula pode ser importante;
- Se houver muita variabilidade na carga que os trabalhos impõem nas células. Neste caso, o conhecimento do *lead time* em cada célula poderá não ser suficiente para cumprir as datas de entrega das encomendas, uma vez que não há uma reordenação dos trabalhos em função do seu estado (adiantado ou atrasado);
- Quando há muitas interseções entre os *loops* POLCA, por exemplo se os trabalhos chegarem a uma célula vindos de células diferentes. Neste caso a ordenação dos trabalhos pela regra FCFS pode não ter resultados satisfatórios, particularmente se houver muita variabilidade nos tempos de processamento em células a montante, alguns trabalhos podem atrasar-se e outros podem chegar mais cedo do que o esperado, justificando a necessidade de usar datas de autorização;
- Quando há mudanças constantes no planeamento após os trabalhos serem lançados em produção, no RF-POLCA não há como acomodar estas mudanças. No POLCA, contudo, é possível, pois as alterações irão originar novas datas de autorização;

#### 2.4 Estudos realizados no âmbito do POLCA e RF-POLCA

Vários estudos, tanto teóricos como práticos, têm sido levados a cabo sobre o desempenho do POLCA. A tabela 1 resume os principais estudos teóricos, enquanto as tabelas 2 e 3 resumem as principais implementações práticas. Por último, a tabela 4 compara o POLCA com outros mecanismos de produção.

Tabela 1 - Estudos teóricos no âmbito do POLCA

| Referências Bibliográficas       | Descrição do Trabalho   |
|----------------------------------|---|
| (Fernandes et al., 2020)         | Este estudo utiliza a simulação para avaliar o desempenho do POLCA num sistema com dois estágios produtivos, comparando-o a um sistema que usa o mecanismo num único estágio. No primeiro estágio as peças são fabricadas e na segunda são montadas num produto final. Os resultados obtidos demonstram que o uso do POLCA nas duas etapas supera o uso em apenas uma (na montagem final), permitindo a redução do <i>flow rate</i> e a percentagem de encomendas atrasadas.  |
| (Ching et al., 2015)             | Este trabalho teve como objetivo apresentar o procedimento sistemático de desenvolvimento do mecanismo POLCA, com dados reais de um fabricante <i>job shop</i> , utilizando a simulação. Verificou-se uma redução do tempo de fluxo depois da implementação do POLCA concluindo-se que este mecanismo é apropriado para produções em ambiente <i>job shop</i> .   |
| (Eng et al., 2015)               | Neste estudo é realizado uma comparação, através da simulação, do desempenho do sistema atual com o sistema após a aplicação do mecanismo POLCA num ambiente <i>job shop</i> . Tendo como parâmetros de medição a quantidade de WIP, o tempo de fluxo e o <i>flow rate</i> . Após a aplicação do mecanismo, verificou-se uma redução de 6,81% no tempo de fluxo, de 2,75% na quantidade de WIP e um aumento do <i>flow rate</i> de 4,25%.   |
| (Severino & Godinho Filho, 2019) | Este trabalho, realizado numa empresa da indústria automóvel, teve como objetivo explicar como o mecanismo POLCA consegue ser eficiente na coordenação do fluxo de produção em cadeias de abastecimento. O estudo foi validado recorrendo à simulação e os resultados indicam que a proposta desenvolvida tem potencial de permitir que a empresa mantenha o seu abastecimento, mas com uma redução significativa de <i>stock</i> originando um melhor fluxo de produção. Outros indicadores também apresentam melhores valores no novo cenário proposto, tais como a quantidade de WIP, e o <i>stock</i> de segurança. Concluiu-se que a lógica do mecanismo POLCA também pode ser usada para coordenar o fluxo de produção entre a empresa e os fornecedores. |
| (Aziz et al., 2013)              | Este trabalho teve como objetivo minimizar a espera das filas de peças localizadas a jusante ( <i>downstream</i> ) na linha de produção, minimizando o WIP ao restringir o inventario de produtos inacabados nas fases iniciais de produção. Para atingir esta meta foi desenvolvido um modelo de um <i>flow shop</i> flexível com o mecanismo POLCA, com recurso à simulação. Através da simulação foi possível obter as filas de espera das peças em cada estação e os resultados comparados entre o modelo com e sem o uso do POLCA. Os resultados obtidos mostraram que com o uso do mecanismo POLCA foi possível reduzir o WIP, através da mudança de filas  |

|                         |   |
|-------------------------|---|
|                         | de peças desnecessárias nas estações com <i>bottlenecks</i> para a primeira estação de trabalho.  |
| (Thürer et al., 2020)   | Este estudo demonstrou como os mecanismos POLCA e COBACABANA podem complementar-se e não serem concorrentes como é usual em vários outros estudos. Através da simulação, foi avaliado o desempenho dos dois mecanismos num ambiente de variedade elevada por encomenda. Os resultados demonstram que o COBACABANA obteve melhores resultados que o POLCA, mas o uso dos dois mecanismos em simultâneo superou o uso singular de cada um deles. Adicionando a parte da autorização característica do POLCA ao <i>order release</i> do COBACABANA, resultou numa redução do tempo de produção entre 15 a 26% e a percentagem de atrasos até 14%. Comparando ao caso sem mecanismo de controlo, esta combinação entre o POLCA e o COBACABANA (COBA-POLCA) regista uma redução de 40% em relação a atrasos e mais do que 30% em atrasos médios. |
| (Thürer et al., 2019)   | Este trabalho teve como propósito a avaliação do elemento de autorização do mecanismo POLCA, através de simulação. Os resultados indicaram que o elemento de autorização, apesar de reduzir a conclusão antecipada de trabalhos, tem um efeito prejudicial na percentagem de atrasos e nos atrasos médios. Comparando a performance do POLCA com a do POLC, num ambiente divergente, este último supera o POLCA em termos de tempo de processamento total, percentagem de trabalhos atrasados e atrasos médios. Concluiu-se que este elemento não deve ser parte integrante do POLCA, passando a designar-se por POLC, e como substituto é preferível utilizar uma regra de despacho em cada estação de trabalho.   |
| (Vandaele et al., 2005) | Este estudo foi desenvolvido na Spicer Off-Highway Products Division, uma oficina de metais onde foi proposta uma estrutura de suporte para o POLCA, sem papeis e sem cartões físicos com auxílio de um ARP. Esta adaptação do POLCA designa-se de E-POLCA. O ARP captura o comportamento estocástico da capacidade de produção para obter as ordens de autorização e as cargas de trabalho permitidas nos <i>loops</i> . Os esforços da empresa resultaram num mecanismo que controla o fluxo de materiais necessários através de recursos disponíveis que tem a maior probabilidade de estarem disponíveis e acreditam que a abordagem feita por este mecanismo será valiosa para prática industrial.   |
| (Vandaele et al., 2008) | Este artigo desenvolvido na Spicer Off-Highway Products Division. propõe uma nova variante do mecanismo POLCA, o LB-POLCA ( <i>Load-Based POLCA</i> ). Este determina os parâmetros do POLCA, como por exemplo as datas de autorização, de acordo com o ARP. O ARP é um sistema de planeamento avançado de recursos que captura adequadamente o comportamento estocástico da produção e permite a otimização de alto nível do tamanho dos lotes. Este sistema produz  |

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
|                                 | <p>parâmetros de entrada necessários para calcular as ordens de autorização, bem como as cargas de trabalho permitidas por <i>loop</i> no mecanismo LB-POLCA. O LB-POLCA fornece uma representação mais adequada e robusta da capacidade disponível em ambientes em que os tempos de processamento das ordens de produção variam significativamente e as mudanças no <i>mix</i> de produtos ocorre frequentemente. Os resultados indicam que este mecanismo oferece vantagens significativas em comparação a um mecanismo de programação finito porque é um mecanismo autorregulado, muito mais simples de executar e mais robusto.</p>  |
| (Fernandes & Carmo-Silva, 2006) | <p>Este estudo apresenta o gPOLCA (<i>generic POLCA</i>), uma adaptação do mecanismo POLCA, e compara a performance entre o POLCA, gPOLCA e o MRP. O gPOLCA, diferente do POLCA, implementa uma estratégia de despacho que controla entradas e saídas com base no inventário de cartões de autorização da produção e não em materiais. Esta comparação foi feita num ambiente de produção de múltiplos produtos, sob mudança do tipo de produtos e procura altamente variável. Neste ambiente, a performance do POLCA é superior à do MRP, mas inferior ao do gPOLCA pois este mecanismo garantiu o mesmo nível de rendimento com menos WIP. Esta versão do POLCA é mais adequada para empresas que produzem vários tipos de produtos com procura variável.</p>  |
| (Harrod & Kanet, 2013)          | <p>Este estudo considera o controlo do fluxo de trabalho num ambiente com configuração <i>job shop</i>, de produção <i>make-to-order</i> (MTO). Este artigo considera os efeitos da interação da escolha do método do controlo do fluxo de trabalho e da disciplina da fila de espera em cada célula de trabalho. Através da simulação, avaliaram uma oficina com 5 células de trabalho com sequências de processos e tempos de processamento independentes numa matriz experimental de quatro mecanismos de controlo de produção (sem mecanismo, <i>Kanban</i>, CONWIP e POLCA) e 3 regras de despacho (FCFS, tempo de processamento mais curto e data de entrega mais cedo). Os resultados indicam que a escolha da regra de despacho é muito mais significativa que a escolha do mecanismo de controlo de produção. Registaram também que ao utilizar o POLCA, os trabalhos ficavam parados na linha de produção, um fenómeno que deram o nome de <i>lockup</i>. Este fenómeno ocorre devido a um conflito entre rotas em que duas células de trabalho, com <i>loop</i> entre elas, fiquem incapazes de trabalhar pois nenhuma liberta o cartão POLCA que a outra necessita. Uma solução para este problema seria a introdução de <i>safety cards</i> (cartões de segurança).</p> |

A tabela 1 reporta diferentes estudos teóricos do POLCA. Podemos retirar desta análise que o POLCA é um mecanismo de controlo que pode ser utilizado em setores distintos, tais como automóvel e de metalomecânica, permitindo benefícios ao nível da redução do WIP, tempo de percurso, tempos nas filas de espera e custos associados aos *stocks*.

Foi possível perceber que o POLCA é apropriado para configurações do tipo *flow shop*, mas não do tipo *job shop*. Também foi possível compreender que o POLCA é um mecanismo versátil pois pode ser combinado com outros mecanismos de produção, neste caso o COBACABANA, para melhorar o desempenho do sistema de produção.

Tabela 2 - Implementações Práticas do POLCA

| Referências Bibliográficas   | Descrição do Trabalho  |
|------------------------------|--|
| (Wang et al., 2021)          | Este estudo, realizado numa fábrica da indústria de produtos de precisão, investigou a eficácia do POLCA para reduzir o <i>lead time</i> . A fábrica decidiu implementar o mecanismo POLCA porque estavam a receber multas devido ao incumprimento de datas de entrega. Os resultados indicaram, após a implementação, uma melhoria significativa no <i>lead time</i> e no WIP. Em termos de <i>lead times</i> , o produto A passou de 74,5 dias para 1 e o produto B de 77 dias para 1. Também foram registadas melhorias significativas em termos de redução da perda percentual de lucro, passou para 0,3% e originalmente encontrava-se nos 40%.   |
| (Krishnamurthy & Suri, 2009) | Este estudo apresenta uma explicação de como planear e implementar o mecanismo POLCA, sendo este aplicado em duas fábricas diferentes. A primeira fábrica, localizada no Iowa, produz partes maquinadas e decidiram implementar o POLCA pois tinham excesso de produto acabado e WIP, para além de longos prazos de entrega. Após a implementação, a redução de <i>lead times</i> variou entre os 22 e os 68%, o WIP e os stocks foram reduzidos entre 75 a 90%. Na segunda fabrica, produtora de motores em Wiscosin, decidiram implementar porque pretendiam controlar a quantidade de WIP, que as células de trabalho respondessem efetivamente as mudanças frequentes de procura e para aliviar a pressão no gabinete de planeamento. Os resultados demonstraram uma redução no WIP e nos <i>lead times</i> das células de montagem em cerca de 25%. |
| (Riezebos, 2010)             | Este trabalho teve como foco a investigação e discussão do mecanismo POLCA, mais propriamente da sua estrutura onde é sugerido o uso de 5 passos para avaliar este, e é descrita a implementação do mecanismo POLCA no primeiro caso prático de implementação do POLCA numa PME holandesa. Concluíram que quanto à estrutura do mecanismo, a parte dos <i>loops</i> e do número  |

|  |  |
|--|--|
|  | <p>de cartões são os pontos em que a literatura se foca e há menos atenção quanto ao sistema despacho. Devido a isso, propuseram uma análise que consiste em 5 passos. Quanto ao caso pratico, este tinha como principais objetivos a redução da quantidade de WIP, tempos de processamento e os <i>lead times</i> de 6-8 semanas para 2 semanas. Após a implementação, os resultados indicaram tempos de processamentos mais curtos e redução dos <i>lead times</i> superior a 70%. Outros benefícios registados foram o aumento da satisfação e confiança dos funcionários.</p>  |
| (Cypher & Carlson, In The Practitioner's Guide to POLCA, 2018)   | <p>Este trabalho foi realizado na Alexandria Industries, uma empresa norte-americana de extrusão de alumínio. Decidiram implementar o POLCA pois não estavam satisfeitos com os <i>lead times</i> obtidos para cada encomenda. A implementação inicialmente foi só realizada para um <i>loop</i> e em menos de 2 meses, verificaram-se reduções de WIP em 75% em termos monetários e de espaço ocupado. Depois de ser implementado em toda a linha, registou-se reduções nos tamanhos de lote, filas de espera e dos níveis de stock. Registaram-se reduções na quantidade de WIP e substituindo o WIP não-produtivo, conseguiram colocar recursos mais produtivos e assim aumentaram a produção no mesmo espaço. Atingiram <i>lead time</i> de 1 semana, quando anteriormente era entre 8 e 12 semanas resultando em entregas quase perfeitas, ao nível de prazos.</p>  |
| (Pollet & Proesmans, In The Practitioner's Guide to POLCA, 2018) | <p>Esta implementação teve lugar na Bélgica, numa empresa metalúrgica chamada Provan. Decidiram utilizar o mecanismo POLCA, numa zona da fábrica, devido a um contrato com um cliente pois este pretendia 3 variações de um determinado produto(forno) e decidiram que o POLCA era uma boa solução para entregar os produtos dentro dos prazos. Contentes com os resultados obtidos, onde reduziram <i>lead times</i> e melhoraram a qualidade do produto final, decidiram implementar nas outras zonas da fábrica. Devido a uma série de fatores, nas restantes zonas decidiram implementar o E-POLCA (Electronic POLCA). O primeiro benefício após a implementação foi uma maior "transparência" no chão de fábrica, pois todos os trabalhadores agora tinham acesso às informações em tempo real através do sistema integrado. E devido aos prazos curtos e altamente confiáveis de entrega, o cliente concordou num preço 11% acima.</p> |
| (Bağ, In The Practitioner's Guide to POLCA, 2018)                | <p>Este trabalho realizou-se numa empresa polaca, a Szklo Sp. z o.o., especializada no tratamento de vidro e espelhos. Decidiram implementar o POLCA pois estavam com excesso de inventário, ocorriam mudanças de planeamento frequentes, necessidade de horas extraordinárias e que seria a solução mais apropriada para a empresa em vez de um <i>software</i> de planeamento. Os resultados do</p>  |

|  |  |
|--|--|
|  | mecanismo notaram-se logo poucos meses após a implementação: redução de 56% na quantidade de WIP, redução de lead time superior a 50% e que originou a menos mudanças no planeamento, aumentou a produtividade das máquinas. |
|--|--|

A tabela 2 apresenta os estudos práticos realizados com o POLCA. Os estudos abrangem, novamente, os mais diversos setores. Resumidamente da análise efetuada podemos concluir, paralelamente aos estudos teóricos, uma redução das datas de entrega, do WIP e dos stocks em armazém. Relativamente ao RF-POLCA não parecem existir estudos comparativos com outros mecanismos na literatura. Existem, contudo, algumas implementações industriais descritas em Suri (2018), as quais se encontram resumidas na tabela 3, seguinte.

Tabela 3 - Implementações Práticas do RF-POLCA

| Referências Bibliográficas                                    | Descrição do Trabalho  |
|---|--|
| (Bos & Ferris, In The Practitioner's Guide to POLCA, 2018)    | Esta implementação foi realizada na Patheon, uma empresa de produtos farmacêuticos sediada no Canadá. Não estando satisfeitos com o uso do MRP na empresa devido ao acumular de WIP resultando em lead times cada vez maiores, decidiram encontrar outro sistema de controlo de produção e começaram a estudar o POLCA e o CONWIP. Depois de uma análise preliminar a ambos, concluíram que para a empresa o uso do POLCA, mais especificamente o RF-POLCA, seria o mais adequado devido ao número de máquinas que possuíam e aos <i>lead times</i> de 20 dias. Após três meses de implementação, verificaram-se bons resultados: redução do lead time de 20 para 10 dias, redução do WIP, aumento do <i>flow rate</i> em 20% e melhorias ao nível do planeamento. |
| (Menner, In The Practitioner's Guide to POLCA, 2018)          | Esta implementação foi realizada numa empresa alemã, a Preter, produtora de componentes fresados em máquinas CNC. A empresa implementou inicialmente o MRP, mas com resultados piores comparativamente ao pré-MRP. Menner aconselhou o uso do RF-POLCA depois de perceber os problemas que a empresa queria resolver, entre os quais, redução de lead times e WIP. Após a implementação, houve uma redução significativa no número de queixas por parte clientes, uma redução de 30% no <i>Manufacturing Critical-path Time</i> (MCT – uma métrica de <i>lead time</i> ) e por fim, conseguiram começar a cumprir datas de entrega.  |
| (Kaanen & Peters, In The Practitioner's Guide to POLCA, 2018) | Esta implementação teve lugar na Bosch Hinges, uma empresa de <i>high-mix low-volume</i> que produz dobradiças, na Holanda. A empresa precisava de resolver problemas ao nível da quantidade de WIP, como é que as células de trabalho <i>upstream</i> sabiam especificamente o que fazer para fornecer as células <i>downstream</i> no  |

|  |  |
|--|--|
|  | <p>momento certo e como lidar com as limitações de capacidade nas células devido a imprevistos. Após descobrirem o POLCA através de um colaborador da empresa, decidiram aplicá-lo a esta e escolheram o RF-POLCA, uma versão do POLCA mas mais simplificada. Os resultados obtidos mostraram uma melhoria inicial nos <i>lead times</i> de 6-8 semanas para 4, e no futuro passaram para 2-3 semanas. Uma melhoria na produtividade dos trabalhadores também foi registada.</p> |
|--|--|

Após a análise da tabela 3, podemos concluir que, tal como na implementação do POLCA, o RF-POLCA permite às empresas uma redução nos *lead times*, no WIP e um aumento do fluxo de trabalhos. Uma das implementações indica que é preferível o uso do RF-POLCA ao POLCA em fábricas com um número de máquinas reduzido e este será um dos pontos abordados nesta dissertação.

Tabela 4 - Comparação do POLCA com outros mecanismos de controlo da produção e do fluxo de materiais

| Referências Bibliográficas    | Descrição do Trabalho  |
|-------------------------------|--|
| (Kabadurmus, 2009)            | <p>Neste trabalho é realizado uma comparação em diferentes cenários e em condições erráticas de procura, com recurso à simulação, entre os sistemas de controlo de produção POLCA e CONWIP. Os cenários experimentais baseiam-se no tamanho do lote, tipo de produto, tempo de inatividade das máquinas, horário entre chegadas e no coeficiente de variação (dos tempos de processamento). Os resultados obtidos demonstraram que o POLCA é a escolha apropriada, nas condições enunciadas, enquanto o CONWIP tende a ter um desempenho insatisfatório.</p> |
| (Farnoush & Wiktorsson, 2013) | <p>Este caso de estudo foi realizado numa linha de produção divergente, na área automóvel, onde foi comparado o POLCA e o CONWIP. Consideraram como critérios principais de comparação o <i>flow rate</i> e o WIP. Os resultados obtidos, através do uso de simulação discreta, indicaram que neste ambiente de produção, o CONWIP obteve resultados mais satisfatórios quanto ao <i>flow rate</i> e à quantidade de WIP. Concluiu que o POLCA não é um mecanismo adequado numa linha divergente devido à falta de sincronização entre as etapas.</p>        |
| (Frazee & Standridge, 2016)   | <p>Este estudo, realizado numa empresa fotónica, compara duas estratégias de volume baixo e variedade elevada (<i>High Mix-Low Volume</i>), o POLCA e o CONWIP através da simulação. Os resultados indicaram uma melhor performance do CONWIP para o sistema estudado pois conseguiu um <i>flow rate</i> maior,</p>  |

|                        |   |
|------------------------|---|
|                        | com menos WIP, do que o POLCA. Em termos de lead times, obtiveram-se resultados idênticos. E verificou-se que o POLCA consegue evitar a aglomeração de WIP numa área, ao contrário do CONWIP.   |
| (Silva et al., 2017)   | Este trabalho apresenta um estudo, com recurso à simulação, que compara a performance dos sistemas de controlo de produção POLCA, <i>Adapted Toyota Kanban System (ATKS)</i> e <i>Generic Kanban System (GKS)</i> num contexto de uma <i>flow shop</i> flexível num ambiente de produções por encomenda. Independentemente da estratégia adotada para a alocação de trabalho nas máquinas em cada fase de produção, verificou-se que o POLCA alcançou resultados inferiores que o GKS e o ATKS.   |
| (Braglia et al., 2014) | Este trabalho teve como objetivo mostrar a capacidade de otimização de um sistema de produção POLCA não-balanceado através de um algoritmo heurístico. Isto devido ao facto de um dos problemas mais significativo ao usar sistemas de produção baseados em cartões, não-balanceados, seja a configuração do número de cartões dentro de cada ciclo. Para validar o trabalho, o mecanismo POLCA foi comparado com o mecanismo CONWIP e m-CONWIP. Os resultados mostram que, num sistema não-balanceado, o POLCA tem uma melhor performance do que o CONWIP e o m-CONWIP, em termos de tempo total de processamento e WIP. |

A tabela 4 apresenta estudos em que o POLCA é comparado a outros mecanismos de controlo da produção e do fluxo de materiais, tais como, COBACABANA e o CONWIP. Tal como nos artigos anteriores, após a implementação do POLCA registaram-se benefícios tais como a redução de WIP, *lead times*, tempo total de processamento e um aumento na taxa de produção. Aparentemente o POLCA não parece ser adequado em sistemas de produção divergentes, devido à falta de sincronização entre etapas, apresentando melhor desempenho em sistemas não-balanceados, contudo parece ser adequado quando há variabilidade na procura nos tempos de processamento. Isto será alvo de atenção nesta dissertação.

# 3. ESTUDO DE SIMULAÇÃO

3.1 Plano Experimental

3.2 Pressupostos considerados

3.3 Medidas de Desempenho

3.4 Modelo de Simulação



### 3. Estudo de Simulação

#### 3.1 Plano Experimental

Com intuito de avaliar o desempenho do mecanismo RF-POLCA e em que circunstâncias este poderá desempenhar adequadamente comparativamente ao mecanismo POLCA, é realizado neste capítulo um estudo de simulação destes dois mecanismos, com recurso ao *software* ARENA.

Por forma a responder à questão de investigação colocada na introdução deste relatório, consideram-se diversos cenários experimentais de forma a testar a influência de três fatores principais: (i) longas cadeias, *i.e.*, trabalhos cuja rota envolve o processamento em diversas células; (ii) variabilidade dos tempos de processamento, *i.e.*, da carga que os trabalhos impõem nas células e (iii) elevadas interseções entre os *loops* POLCA. De acordo com Suri (2018) nestas circunstâncias o mecanismo RF-POLCA, o qual considera apenas a data de autorização na primeira célula na rota dos produtos, poderá não ser o mais recomendado. Contudo, recentemente Thurer et al (2019) mostrou que a melhor forma de operar o POLCA é sem datas de autorização, usando apenas regras de despacho orientadas à data de entrega em conjunto com as autorizações de produção baseadas em cartões – o que parece ser contraditório!

A tabela 5 resume os fatores de experimentação e diferentes níveis considerados no estudo.

Tabela 5 - Fatores de experimentação e níveis de estudo

| Fator de Experimentação                              | Níveis                         |
|--|--------------------------------|
| Mecanismos de controlo                               | POLCA; RF-POLCA                |
| Configurações do sistema de produção                 | Linha; Divergente; Convergente |
| Número de células na rota dos produtos               | 3;5                            |
| Variabilidade dos tempos de processamento ( $CV^2$ ) | 0,5; 0,707                     |
| Número de cartões por <i>loop</i> POLCA              | 7 níveis                       |
| POLCA <i>quantum</i>                                 | unidades; horas                |

Os mecanismos em estudo são o primeiro fator experimental e são testados a dois níveis. A descrição destes foi apresentada no capítulo 2. Os mecanismos são:

- POLCA (*Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*)
- RF-POLCA (*Release-and-Flow Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*)

O segundo fator experimental, configurações do sistema de produção é testado a três níveis, designadamente:

- Em linha (figura 6), *flow shop*

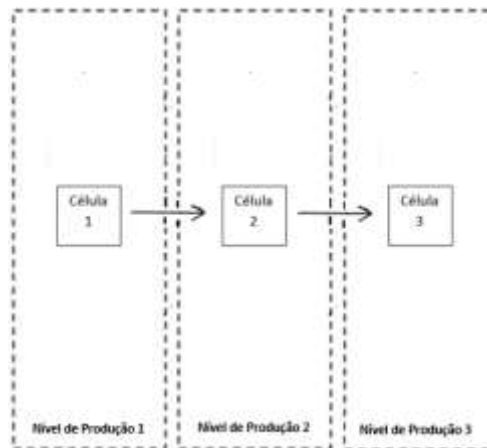


Figura 6 - Representação de um sistema de produção com configuração em linha

- Divergente (figura 7), *job shop*

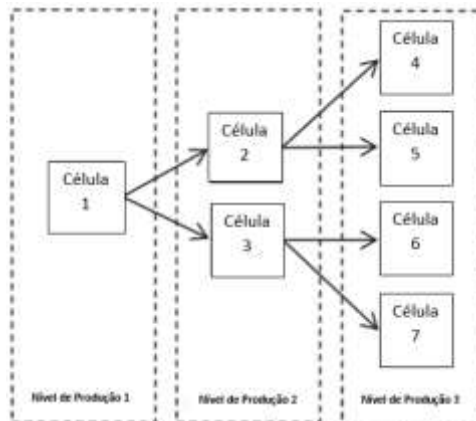


Figura 7 - Representação de um sistema de produção com configuração divergente

- Convergente (figura 8), *job shop*

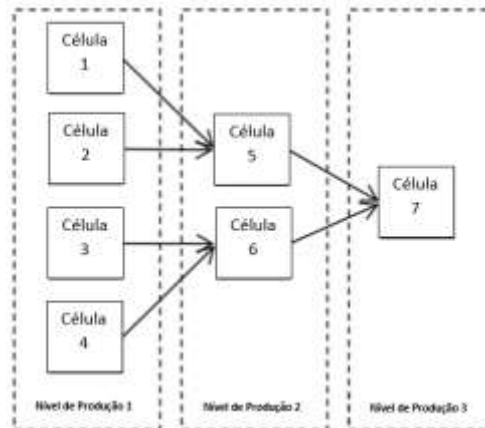


Figura 8 - Representação de um sistema de produção com configuração convergente

O terceiro fator experimental, refere-se ao número de estágios, ou células que o trabalho tem na sua rota, tendo sido testado também a dois níveis, nomeadamente:

- Três estágios;
- Cinco estágios;

Note-se que no caso das configurações convergente e divergente ainda que cada trabalho tenha 3 células na sua rota, o número total de células existentes no sistema de produção com três estágios é de 7. Este número sobe para 31 no caso de um sistema de produção com 5 estágios.

O quarto fator experimental refere-se ao coeficiente de variação ( $CV^2$ ) do tempo de processamento dos trabalhos, o qual é testado a dois níveis, de forma a representar diferentes situações em termos de variabilidade na carga que os trabalhos impõem nas células, nomeadamente:

- $CV^2 = 0,707$ ;
- $CV^2 = 0,5$ ;

O quinto fator experimental, número de cartões POLCA por *loop*, foi testado a sete níveis diferentes. O número de cartões foi ajustado em função do  $CV^2$  e do tipo de configuração, da seguinte forma:

- Número de cartões: infinito, 24, 20, 16, 14, 12 e 10, para as configurações em linha e convergente com  $CV^2=0,707$ ;
- Número de cartões: infinito, 16, 14, 12, 10, 9 e 8, para as configurações em linha e convergente com  $CV^2 = 0,5$ ;
- Número de cartões: infinito, 28, 24, 22, 20, 18 e 17, para a configuração divergente e  $CV^2 = 0,707$ ;

- Número de cartões: infinito, 24, 20, 18, 16, 15 e 14, para a configuração divergente e  $CV^2 = 0,5$ ;

O sexto e último fator experimental, refere-se ao *quantum* dos cartões POLCA, o qual foi testado a dois níveis:

- quantum = unidades; a cada trabalho é alocado um cartão.
- quantum = horas; a cada trabalho é alocado um número variável de cartões da seguinte forma: Se o tempo de processamento for menor que 2, aloca-se um cartão; se estiver entre 2 e 3,7 alocam-se dois cartões; se for maior que 3,7, alocam-se três cartões. Estes valores foram usados de forma a obter uma igual probabilidade em cada um dos intervalos considerados. Neste caso, o número total de cartões disponibilizado em cada *loop* na simulação é o dobro do considerado num quantum baseado em unidades, e corresponde ao valor médio de cartões alocados por trabalho.

Segundo Suri (2018), o *quantum* é a quantidade de trabalho que cada cartão POLCA representa. Se o *quantum* for muito grande, este resultará num fluxo de trabalho pouco frequente, irregular e em lotes. O que provocará variabilidade nas chegadas dos trabalhos às células influenciando as filas e tempos de espera nestas. Por outro lado, se o *quantum* for muito pequeno, uma quantidade elevada de trabalhos pequenos fluirá entre as células, o que resultará num grande número de cartões POLCA em circulação. Segundo Suri, o *quantum* deve ser especificado numa unidade fácil de usar, e o mais simples é representar um trabalho (ou ordem de produção).

Isto resulta num fatorial completo de 336 cenários experimentais ( $2 \times 3 \times 2 \times 2 \times 7 \times 2$ ). Cada cenário foi replicado 100 vezes com um tempo de simulação em regime estacionário de 12000 horas, sendo que as primeira 2000 formam os *warm-up* (i.e., o período de aquecimento, e, portanto, não são consideradas para efeito das estatísticas).

### 3.2 Pressupostos considerados

Em todos os cenários experimentais considerou-se que o intervalo de tempo entre a chegada de trabalhos segue uma distribuição exponencial, em que a média foi ajustada para garantir uma taxa de utilização das células de 90%. Por forma a manter o foco do estudo, as células foram modeladas com recursos de capacidade fixa e unitária. Os tempos de processamento dos trabalhos seguem uma distribuição lognormal de média 1 hora. Considerou-se que o sistema de produção se encontrava balanceado, pelo que nas configurações divergente e convergente a média dos tempos de processamento (TP) foi ajustada em cada estágio produtivo da seguinte forma:

Configuração divergente:

- Três Estágios

- Célula 1 =  $TP/4$
- Célula 2 =  $TP/2$
- Célula 3 =  $TP$

- Cinco Estágios
  - Célula 1 =  $TP/16$
  - Célula 2 =  $TP/8$
  - Célula 3 =  $TP/4$
  - Célula 4 =  $TP/2$
  - Célula 5 =  $TP/1$

Configuração convergente:

- Três Estágios
  - Célula 1 =  $TP$
  - Célula 2 =  $TP/2$
  - Célula 3 =  $TP/4$
- Cinco Estágios
  - Célula 1 =  $TP$
  - Célula 2 =  $TP/2$
  - Célula 3 =  $TP/4$
  - Célula 4 =  $TP/8$
  - Célula 5 =  $TP/16$

Foram ainda adotados os pressupostos seguintes:

- A regra de despacho nas filas de espera é FCFS (*First-Come First-Serve*), tal como sugerido por Suri (2018);
- A passagem de informação acerca da disponibilidade dos cartões POLCA é realizada instantaneamente;
- As distâncias e tempos de movimentação dos produtos entre células são considerados negligíveis;
- Os tempos de *setup* são considerados independentes da sequência de processamento e incluídos no tempo de processamento;

Ao chegar ao sistema, é atribuído a cada trabalho uma data de entrega (DD) e uma *data de autorização* (AD) para cada célula ou apenas para a primeira célula na rota do trabalho, dependendo do mecanismo de controlo usado. A data de entrega é definida da seguinte forma:

$$DD = \text{Data de entrada no sistema} + UNIF(5.x, 5.x + 15) \quad (1)$$

Onde  $x$  é o número de operações que o produto requer e *UNIF* refere-se à distribuição uniforme: por exemplo para um trabalho com 3 operações será gerado com igual probabilidade o tempo entre 15 e 30 horas, o qual é adicionado à data de entrada do trabalho para obter a sua data de entrega.

A *data de autorização* é então determinada da seguinte forma:

$$AD = DD - \sum_{i=1}^n LT_i \quad (2)$$

Onde a variável *LT* se refere a *lead time* por estágio e *n* o número de operações ou estágios na rota do trabalho. Os *lead times* utilizados foram pré-determinados através da simulação de cada modelo com um número infinito de cartões POLCA.

Após chegarem, os trabalhos aguardam à entrada do primeiro estágio pela sua AD e pela disponibilidade de cartões POLCA para serem lançados em produção. Uma vez lançados o controlo do seu fluxo através do sistema de produção é feito com base em ADs para cada uma das células e cartões POLCA para cada um dos *loops* ou então só com base neste último, dependendo do mecanismo de controlo usado, POLCA ou RF-POLCA. Se não houver cartão disponível, o trabalho deve aguardar até que um cartão seja libertado por uma célula a jusante.

### 3.3 Medidas de Desempenho

Para comparar o desempenho dos mecanismos, foram usadas neste estudo as seguintes medidas de desempenho:

- Percentagem de trabalhos em atraso (% Trabalhos em Atraso) – percentagem de trabalhos que são entregues depois da DD;
- *Shop Throughput Time*/Tempo no espaço fabril (TT) – Tempo de percurso do trabalho, desde a sua entrada em produção até à sua conclusão;
- *Total Throughput Time*/Tempo total no sistema (TTT) – Tempo total do trabalho, até à sua conclusão, desde a sua criação;
- *Tardiness* – Medida que representa uma média do número de horas dos trabalhos que terminaram após a DD;

### 3.4 Modelo de Simulação

Tendo em conta a configuração do sistema de produção, foram construídos vários modelos em Arena de forma a implementar o plano experimental da tabela 3. Neste capítulo é apresentado o modelo relativo à configuração divergente com 3 estágios de produção, Figuras 9 a 27.

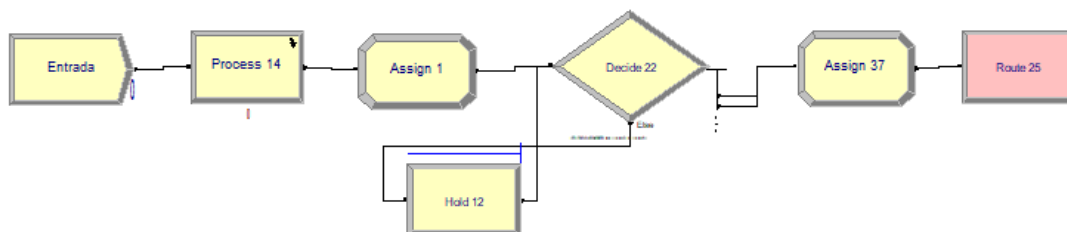


Figura 9 - Chegada e lançamento

Foram criados outros modelos que diferem do aqui apresentado, relativamente à configuração e número de estágios produtivos, que por uma questão de espaço não serão aqui apresentados.

O modelo encontra-se organizado em 3 secções, nomeadamente:

- Uma secção inicial, ilustrada na figura 9, onde se realiza chegada de trabalhos ao sistema e seu lançamento em produção. Para tal é usado bloco *Create* no qual é definido um intervalo entre chegadas de trabalhos ao sistema (figura 10); um *Submodel* (figura 11) para gerar o tempo de processamento para cada estágio de produção e gerar as rotas dos trabalhos; um *Assign* (figura 12) para criar a data de entrada (que será útil para determinar o tempo em que cada trabalho fica no sistema), uma data de entrega (DD), os *lead times* iniciais para cada estágio; O próximo passo é a entrada dos trabalhos em produção sendo para tal usado um *Decide*, para verificar se há cartões disponíveis para alocar ao trabalho (figuras 13 e 14), caso não haja, o trabalho aguarda disponibilidade no bloco *Hold*; caso haja o trabalho é enviado para a primeira célula da sua rota usando o bloco *Route*, sendo previamente registado no bloco *Assign* a data de lançamento na produção, útil para calcular o tempo no espaço fabril do trabalho e fazer a atribuição de um cartão ao trabalho (figura 15 e 16);
- Uma segunda secção, figura 17, representa o espaço fabril com as células de produção. Cada célula do espaço fabril é iniciada como bloco *Enter* que recebe os trabalhos vindos da secção anterior; Os blocos *Assign* e *Delay* são de seguida usados para definir uma data de autorização (AD) na célula, aguardando os trabalhos no *Delay que essa data seja atingida* (figura 18); De seguida ocorre, à semelhança da primeira secção (figuras 13 e 14), uma verificação da disponibilidade dos cartões POLCA; Esta verificação para caso da primeira célula já foi realizada aquando do lançamento em produção. O trabalho de seguida é processado no bloco , contudo antes passa por um bloco *Assign* para registar o tempo de entrada na célula; após processamento o trabalho passa num *Record* para registar o tempo de percurso na célula (figura 19), antes de sair da célula é usado *Assign* para retirar o cartão atribuído, referente ao *loop* POLCA que termina nesta célula (figuras 20 e 21); Por fim, é usado o bloco *Signal* para enviar um sinal ao *Hold* da célula de trabalho a montante para libertar os trabalhos que aí aguardam pela disponibilidade de um cartão (figura 22); Finalmente o *Route* encaminha os trabalhos para a célula seguinte; Após processamento em todas as células o trabalho é encaminhado para terceira e ultima seção do modelo.
- Uma terceira secção, figura 23, é usada para registar as medidas de desempenho. O *Enter* recebe os trabalhos da secção anterior, é seguido de vários blocos do tipo *Record* para registar o número de trabalhos atrasados e os não-atrasados (figura 24), para verificar se a data de entrega é maior ou menor que a data de conclusão do trabalho; o atraso de cada trabalho (figura 25); o TTT; o TT e o *Tardiness* (figuras 26 e 27); O último bloco é um *Dispose* que é usado para

remover os trabalhos do sistema. Finalmente a percentagem de trabalhos foi implementada no menu de estatísticas do *software*.

Quando o *quantum* é referente a unidades, o número de trabalhos no sistema é registado por um contador como ilustrado nas figuras 13,15 e 20. Para o caso de o *quantum* ser em horas, a contabilização passa a ser feita como ilustrado nas figuras 14,16,21.

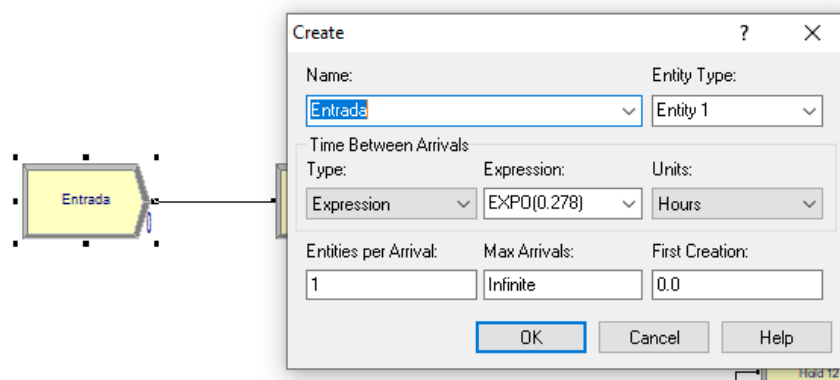


Figura 10 - Bloco de criação dos trabalhos

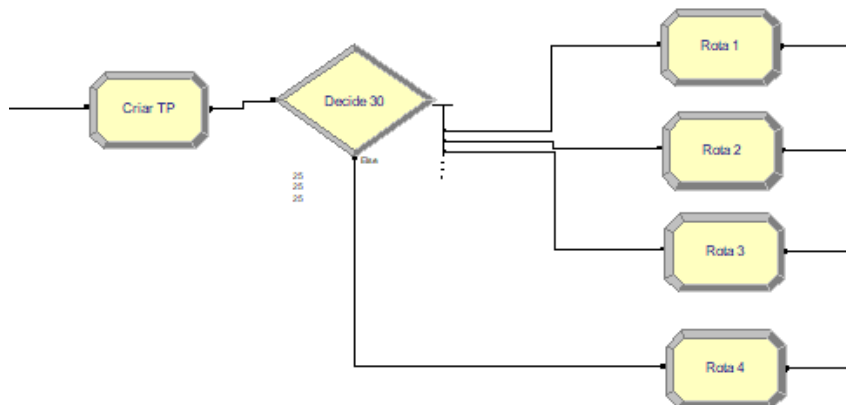


Figura 11 - *Submodel* para a definição dos tempos de processamento em cada célula e atribuição de rotas

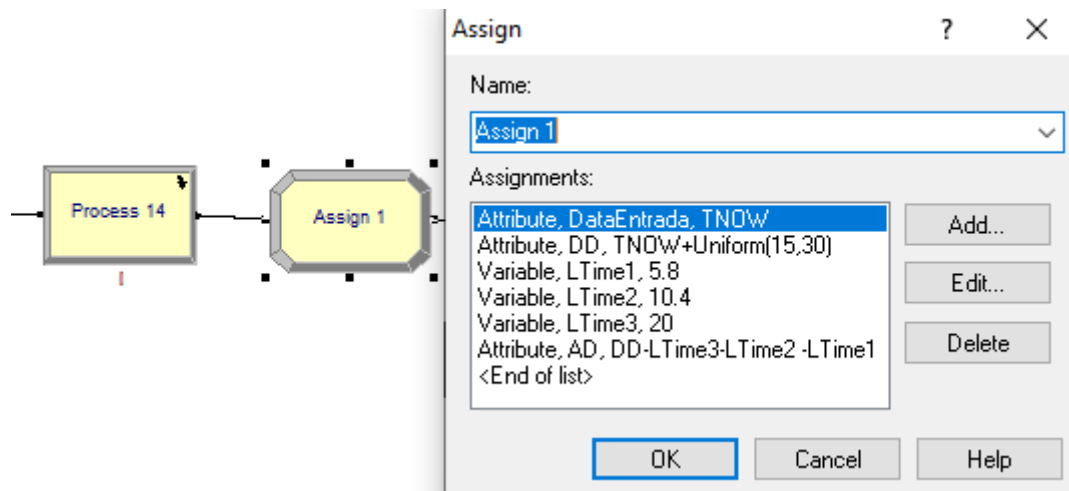


Figura 12 - Criação da data de entrada, DD, lead times iniciais e AD

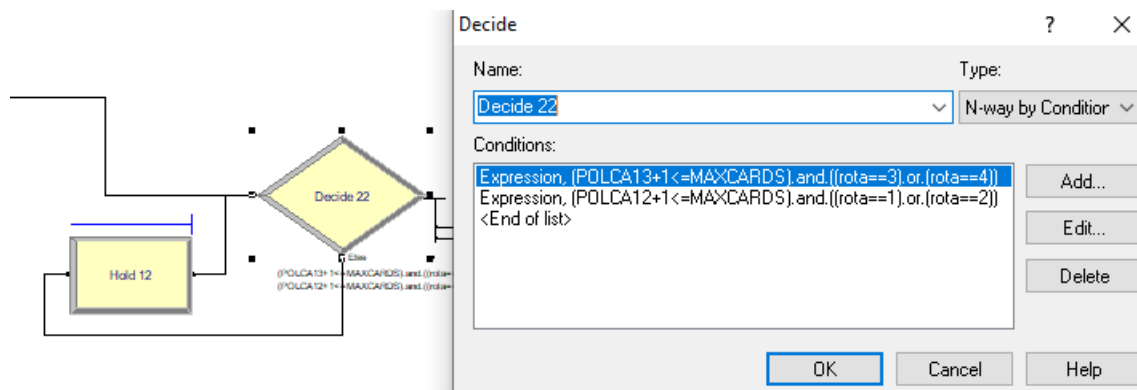


Figura 13 - Verificação de disponibilidade dos cartões POLCA (quantum em unidades)

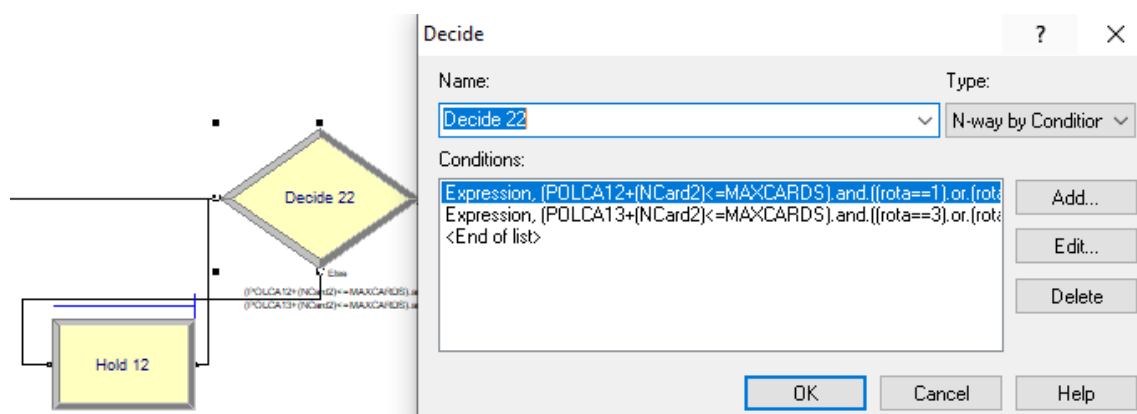


Figura 14 - Verificação de disponibilidade dos cartões POLCA (quantum em horas)

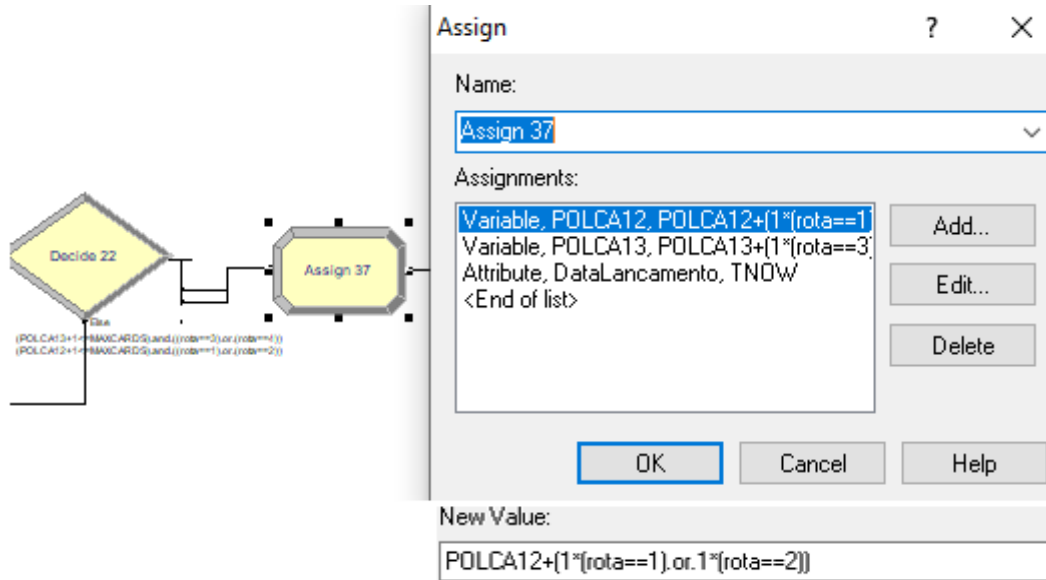


Figura 15 - Condições de atribuição do cartão POLCA (quantum em unidades) e criação da data de lançamento em produção

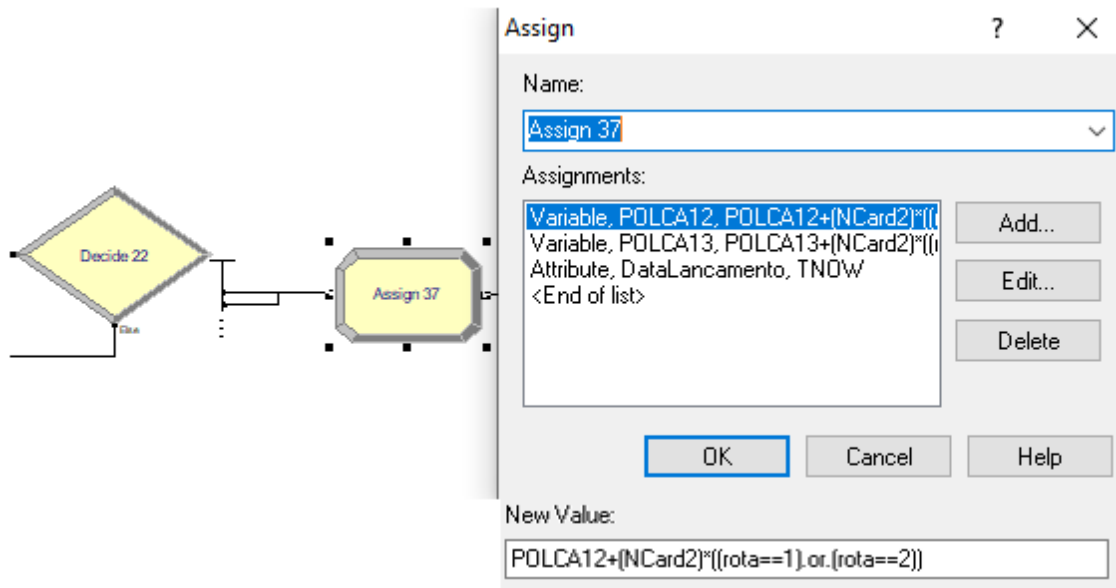


Figura 16 - Condições de atribuição do cartão POLCA (quantum em horas) e criação da data de lançamento em produção

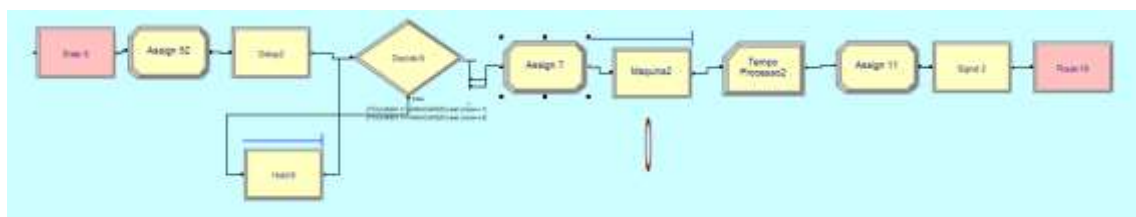


Figura 17 - Célula de trabalho do modelo

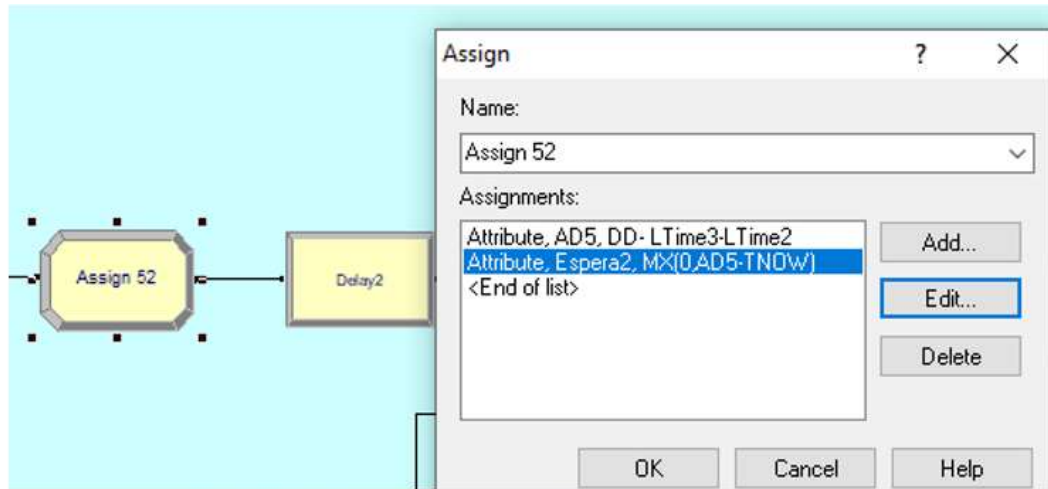


Figura 18 – Criação da AD e do atributo “Espera” para a célula de trabalho

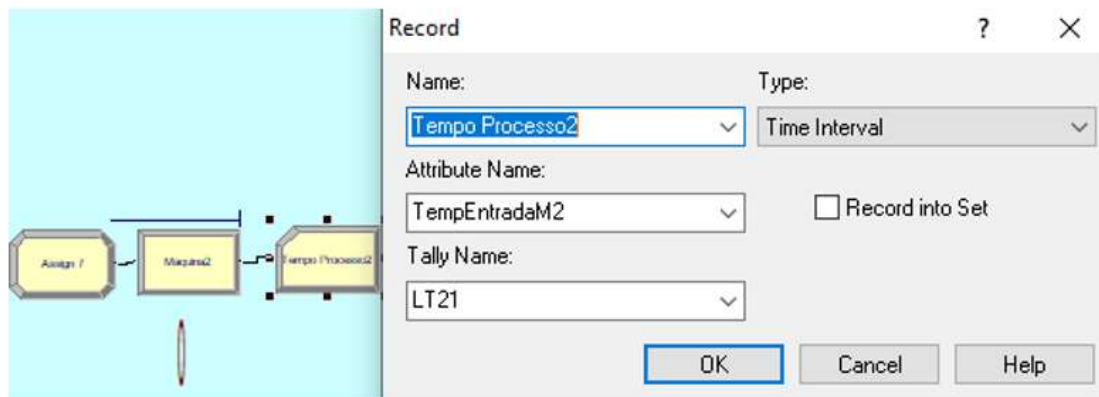


Figura 19 – Processamento do trabalho e registo do tempo de percurso na célula

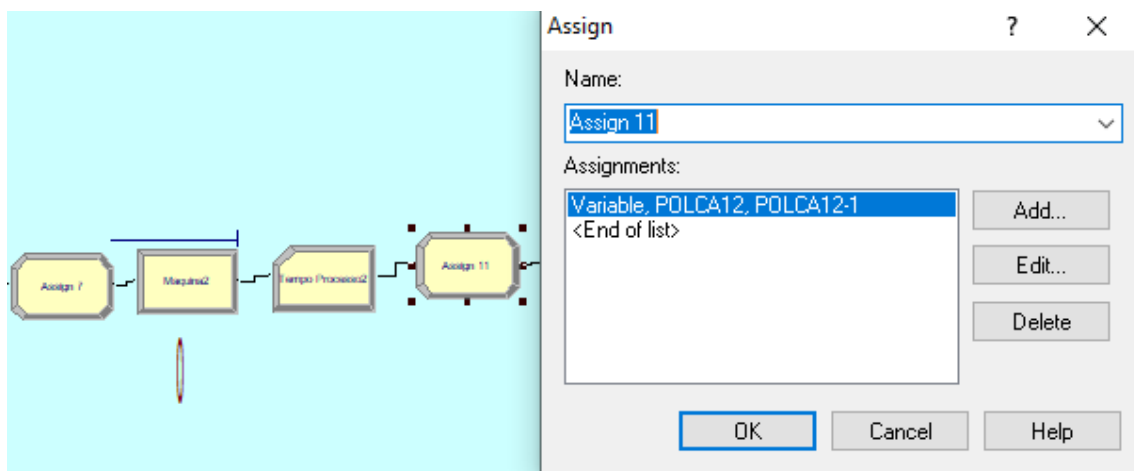


Figura 20 - Remoção do cartão POLCA após a operação na célula (quantum em unidades)

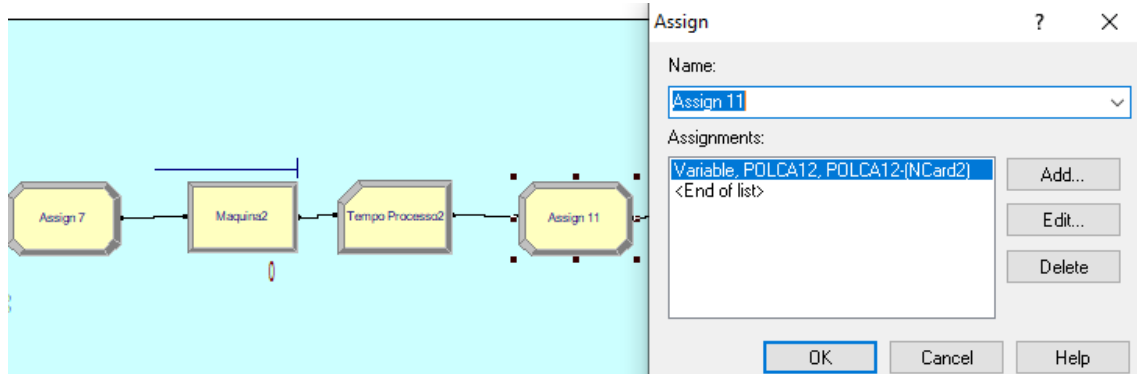


Figura 21 - Remoção do cartão POLCA após a operação na célula (quantum em horas)

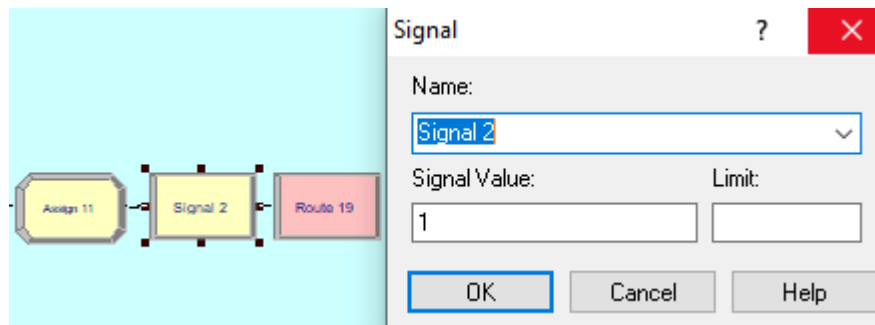


Figura 22 - Sinal de cartão libertado



Figura 23 - Blocos usados para as medidas de desempenho

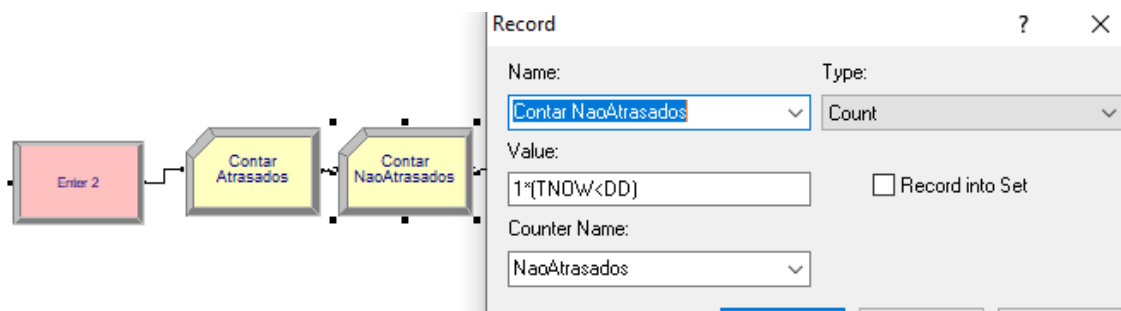


Figura 24 - Registo de Atrasados e Não-Atrasados

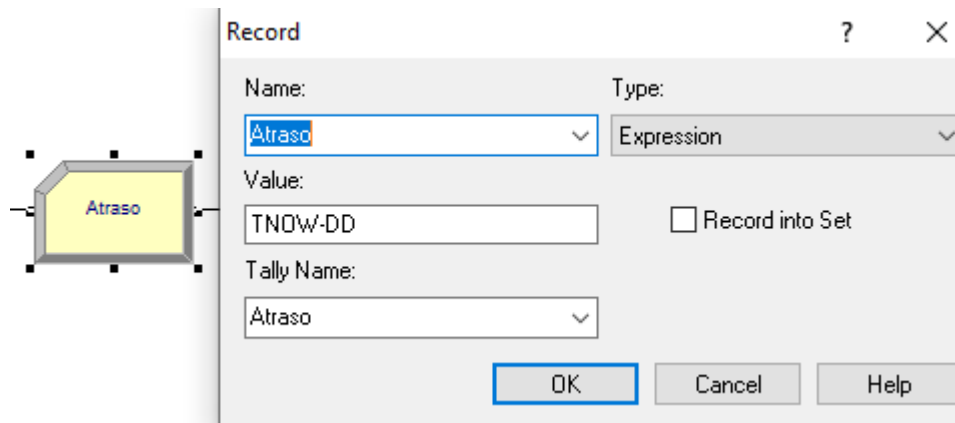


Figura 25 - Registo de atrasos, em horas

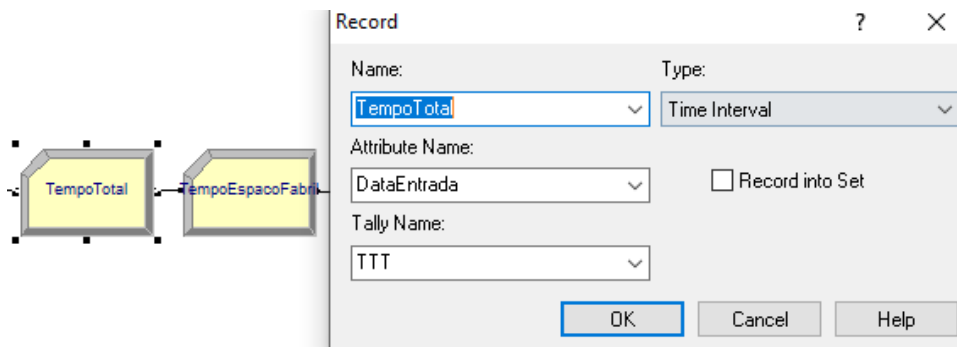


Figura 26 - Registo do TTT e TT

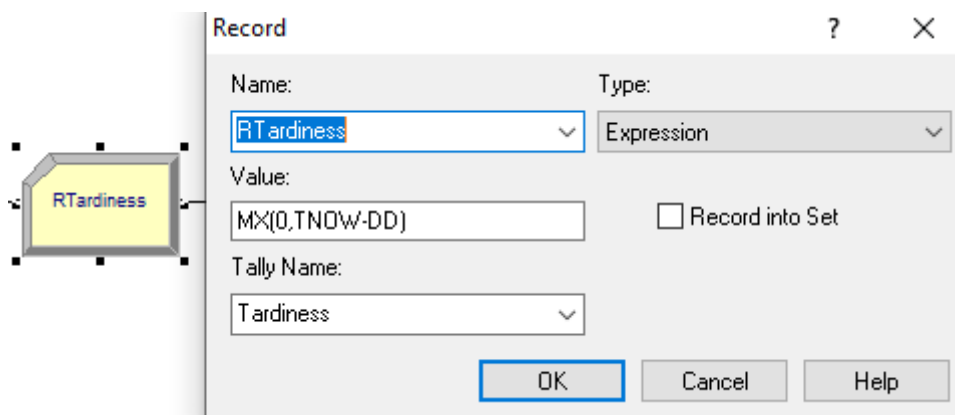


Figura 27 - Registo do Tardiness

# 4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 Configuração em Linha

4.2 Configuração Convergente

4.3 Configuração Divergente



## 4. Resultados e Análise

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos do estudo de simulação envolvendo os mecanismos POLCA e RF-POLCA. Os resultados são apresentados na forma de curvas de desempenho organizadas em gráficos. No apêndice podem encontrar-se os valores obtidos da simulação e usados para a criação destes gráficos.

Através da análise das curvas de desempenho é possível analisar as diferenças de comportamento entre estes dois mecanismos para os diferentes cenários experimentais considerados.

São apresentados três tipos de gráficos relacionando o tempo no espaço fabril (TT), o qual reflete o nível de restrição de cartões POLCA, com: (a) a percentagem de trabalhos em atraso (% Trabalhos em Atraso); (b) o *tempo total no sistema* (TTT) e (c) o *Tardiness*. O ponto mais à direita de cada curva resulta de simular os mecanismos com um número infinito de cartões em cada *loop*, o qual vai sendo restringido, de acordo com os valores indicados na seção 3.1, para obter os pontos à esquerda deste. Note-se que um número infinito de cartões corresponde a controlar o lançamento em produção e o fluxo de trabalhos no espaço fabril apenas com base em datas de autorização, i.e., com base no elemento *push* dos mecanismos.

Na seção 4.1 apresentam-se os resultados para a configuração em linha, enquanto as seções 4.2. e 4.3 apresentam os resultados para as configurações convergente e divergente, respetivamente.

### 4.1 Configuração em linha

#### 4.1.1 Influência da variabilidade dos tempos de processamento

Nas figuras 28 e 29, encontram-se os resultados para a configuração em linha com três estágios produtivos, para as duas situações consideradas em termos de variabilidade dos tempos de processamento, nomeadamente  $CV^2 = 0,5$  e  $CV^2 = 0,707$ . Na figura 28 encontram-se os resultados para um POLCA *quantum* em unidades e na figura 29 para um *quantum* em horas.

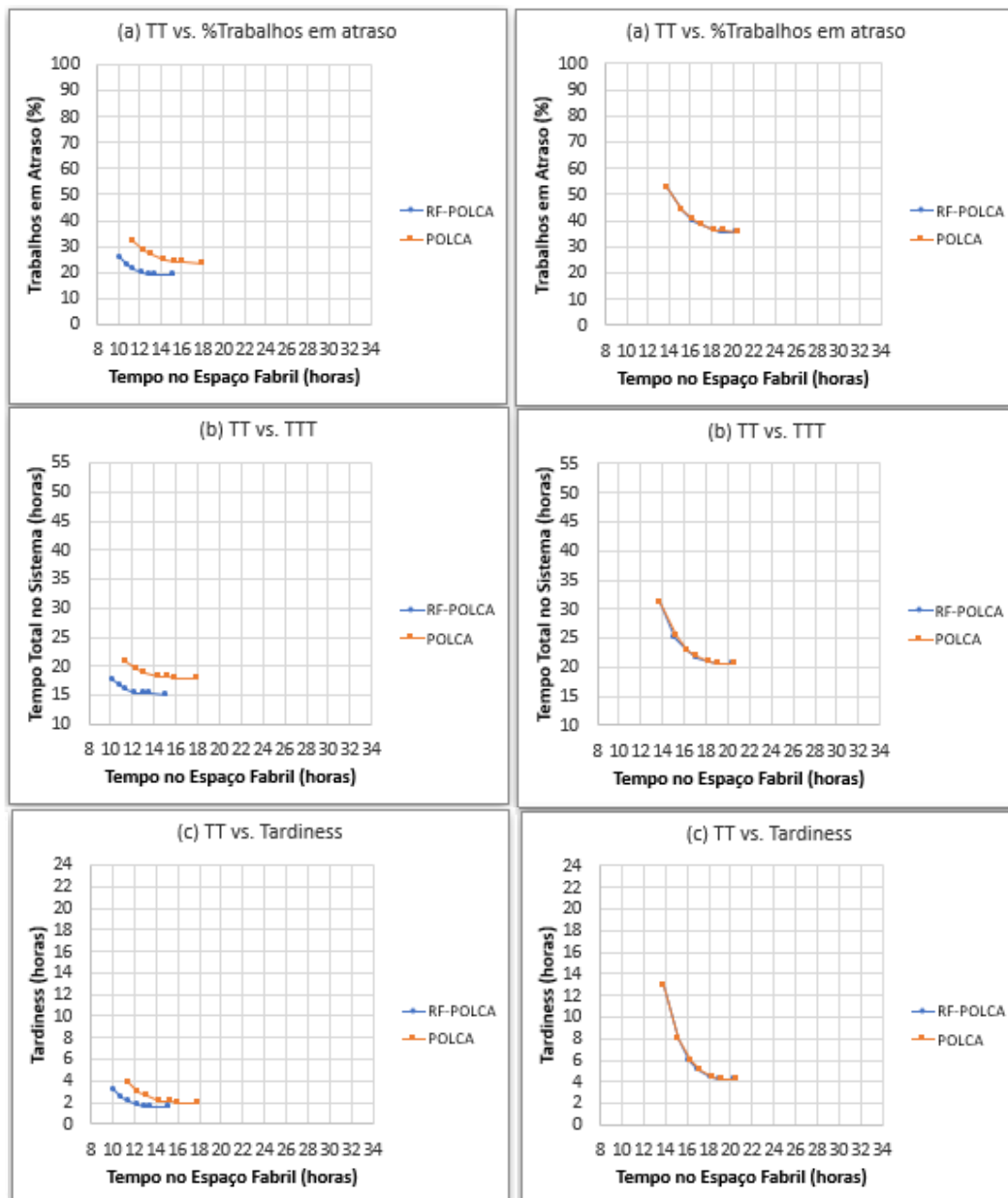


Figura 28 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA na configuração em linha com três estágios, quantum em unidades, com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

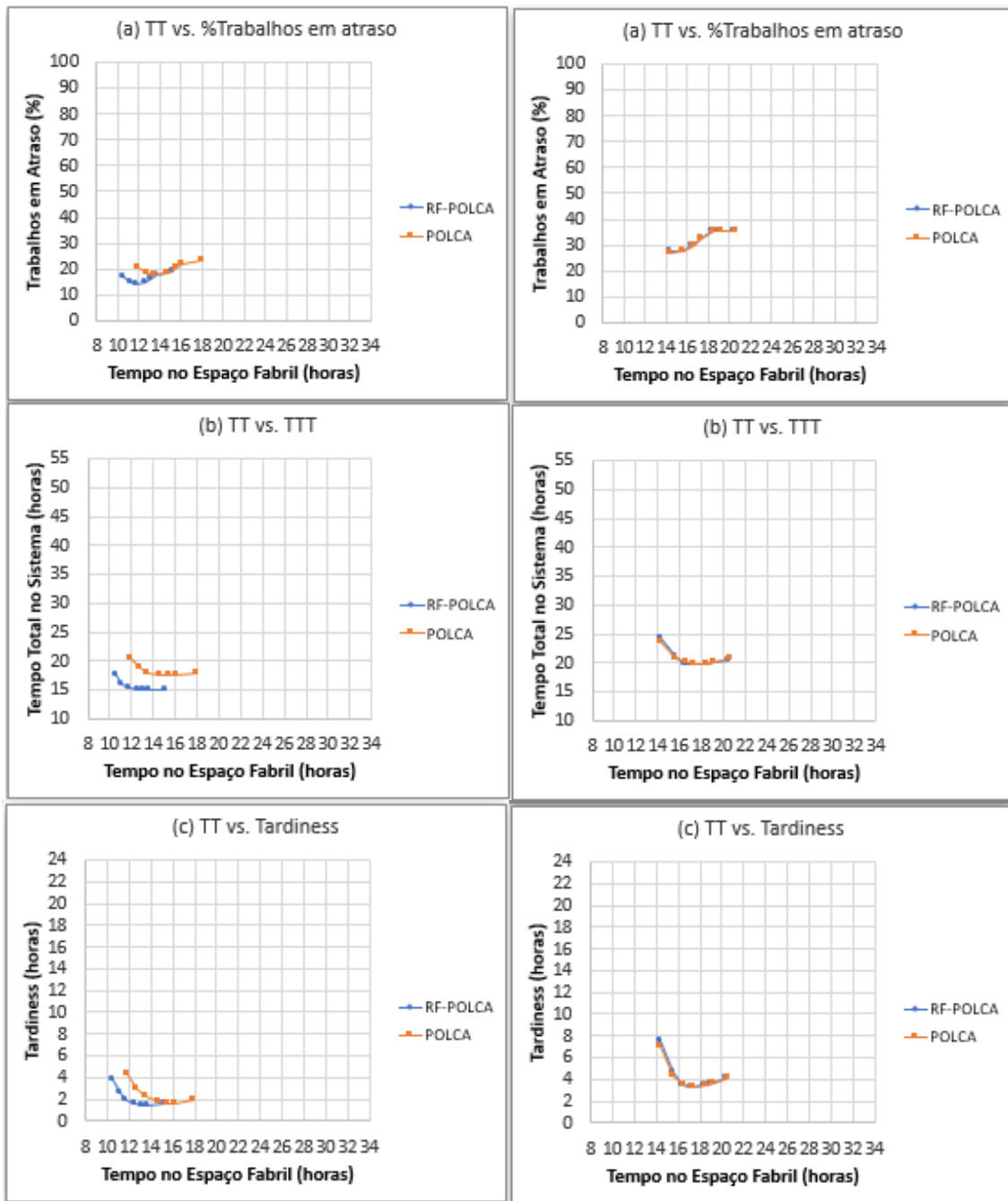


Figura 29 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA na configuração em linha com três estágios, quantum em horas, com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

Da observação dos gráficos da figura 28 pode-se concluir o seguinte:

- O mecanismo RF-POLCA apresenta melhor desempenho, comparativamente ao POLCA, para todas as medidas consideradas, quando  $CV^2 = 0,5$ . Ou seja, resulta numa menor percentagem de trabalhos em atraso, num menor tempo no sistema e num menor *tardiness* para os diferentes números de cartões POLCA usados, traduzido no tempo no espaço fabril.
- O desempenho relativo dos mecanismos de controlo parece depender do nível de variabilidade dos tempos de processamento. Para variabilidade maior, i.e.,

$CV^2 = 0,707$ , o desempenho dos dois mecanismos torna-se similar. Ou seja, o RF-POLCA perde a sua vantagem.

- O desempenho dos dois mecanismos deteriora para níveis de variabilidade mais elevados, como seria de esperar. Contudo, a deterioração é maior no mecanismo RF-POLCA.

Da análise dos gráficos da figura 29 pode-se concluir o seguinte:

- Os resultados obtidos confirmam o desempenho observado quando o *quantum* é referente a unidades, nomeadamente o mecanismo RF-POLCA apresenta melhor desempenho que o POLCA para todas as medidas consideradas quando  $CV^2 = 0,5$  e um desempenho similar ao do POLCA quando  $CV^2 = 0,707$ .
- Quando o controlo é feito com um *quantum* referente a carga, a capacidade de balanceamento dos mecanismos melhora. Ou seja, o ponto mais à direita, correspondente a um número infinito de cartões, deixa de ser o que apresenta o menor tempo total no sistema. Na verdade, por redução do número de cartões POLCA disponíveis é possível melhorar o desempenho de todas as medidas de desempenho.

#### 4.1.2 Influência do número de células na rota dos trabalhos

Nas figuras 30 e 31, apresentam-se os resultados para a configuração em linha com cinco estágios de produção, para as duas situações consideradas em termos de variabilidade dos tempos de processamento,  $CV^2 = 0,5$  e  $CV^2 = 0,707$ . Na figura 30 encontram-se os resultados para um *quantum* em unidades e na figura 31 para um *quantum* em horas.

Dos gráficos da figura 30 pode-se concluir que:

- Os resultados obtidos confirmam o desempenho observado para 3 estágios de produção, nomeadamente: o mecanismo RF-POLCA apresenta melhor desempenho para todas as medidas consideradas, quando  $CV^2 = 0,5$ ; o desempenho dos dois mecanismos aproxima-se quando a variabilidade é maior, i.e.,  $CV^2 = 0,707$ .
- A diferença de desempenho entre os dois mecanismos, para ambos os valores de  $CV^2$  parece aumentar quando as rotas dos trabalhos são maiores, i.e., para 5 estágios de produção.

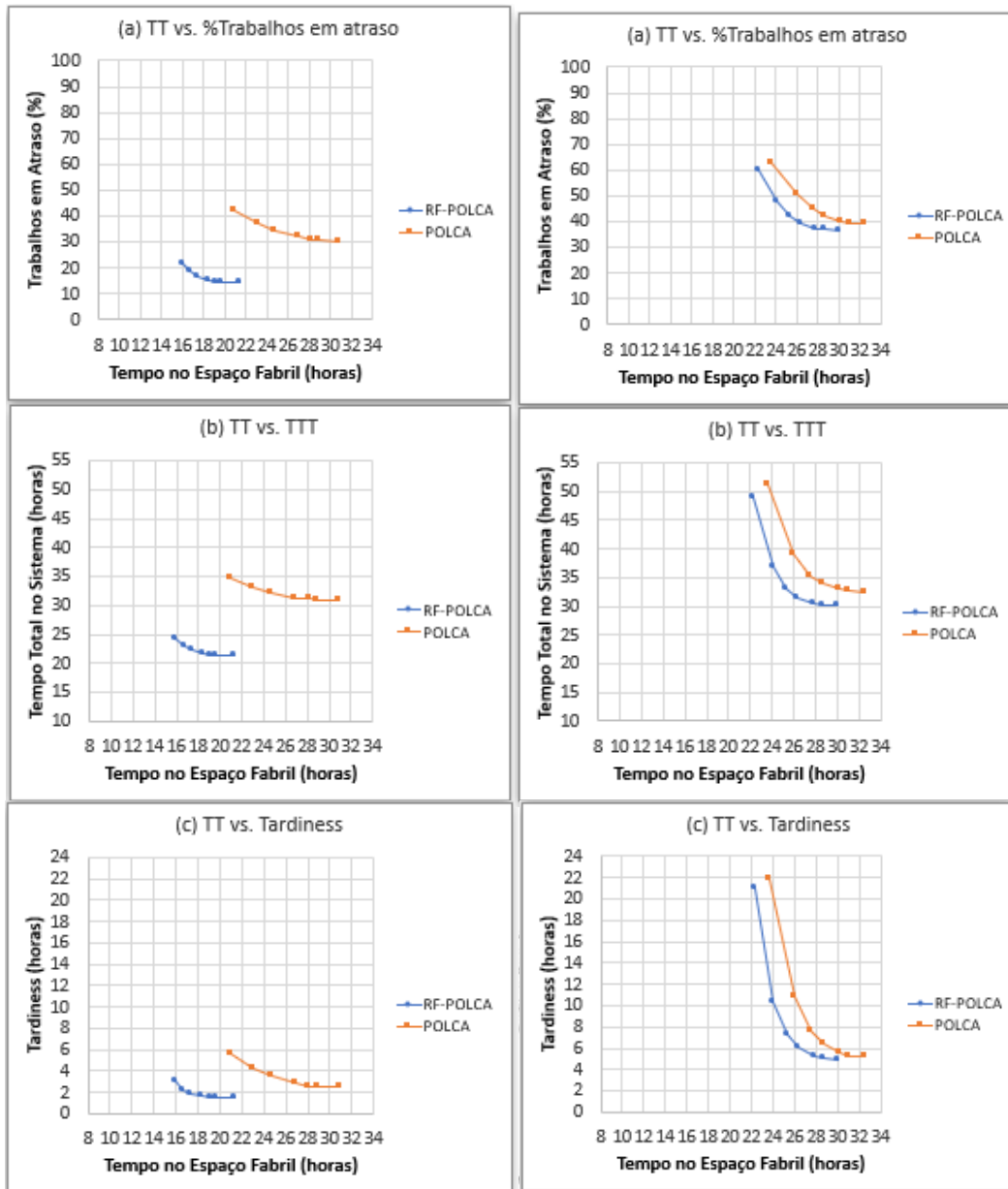


Figura 30 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA na configuração em linha com cinco estágios, quantum em unidades, com  $CV^2=0,5$  (à esquerda) e  $CV^2=0,707$  (à direita)

Da análise dos gráficos da figura 31 pode-se concluir o seguinte:

- Os resultados obtidos confirmam o desempenho observado com um *quantum* de unidades. O mecanismo RF-POLCA continua a ser o que tem melhor desempenho relativo, para todas as medidas de desempenho em estudo. Contudo o desempenho relativo do RF-POLCA diminui com um *quantum* referente a carga.

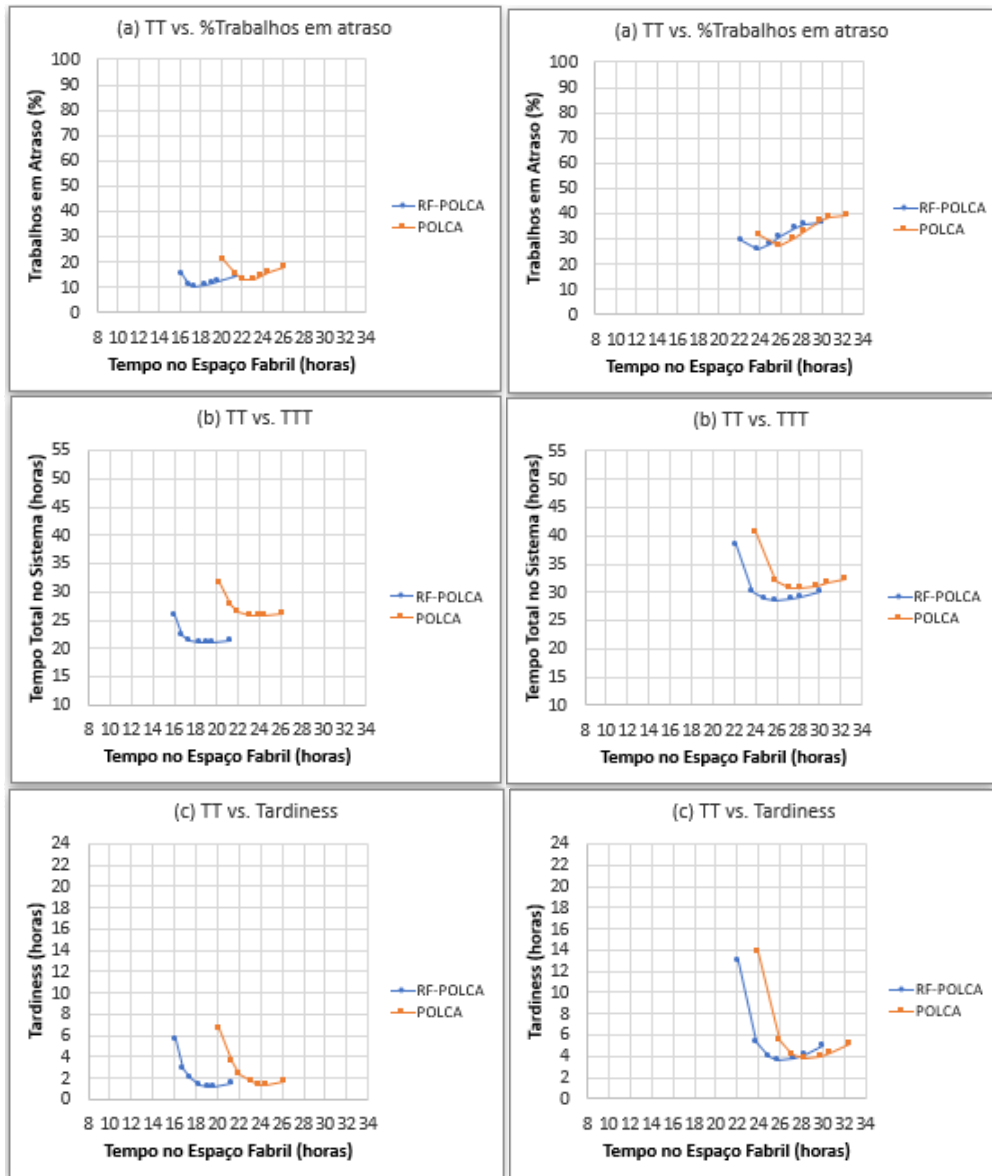


Figura 31 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA na configuração em linha com cinco estágios, quantum em horas com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

## 4.2 Configuração Convergente

### 4.2.1 Influência da variabilidade dos tempos de processamento

Nas figuras 32 e 33, encontram-se os resultados para a configuração convergente com três estágios produtivos, para as duas situações consideradas em termos de variabilidade dos tempos de processamento, nomeadamente  $CV^2 = 0,5$  e  $CV^2 = 0,707$ .

Na figura 32 apresentam-se os resultados para um *quantum* em unidades e na figura 33 para um *quantum* em horas.

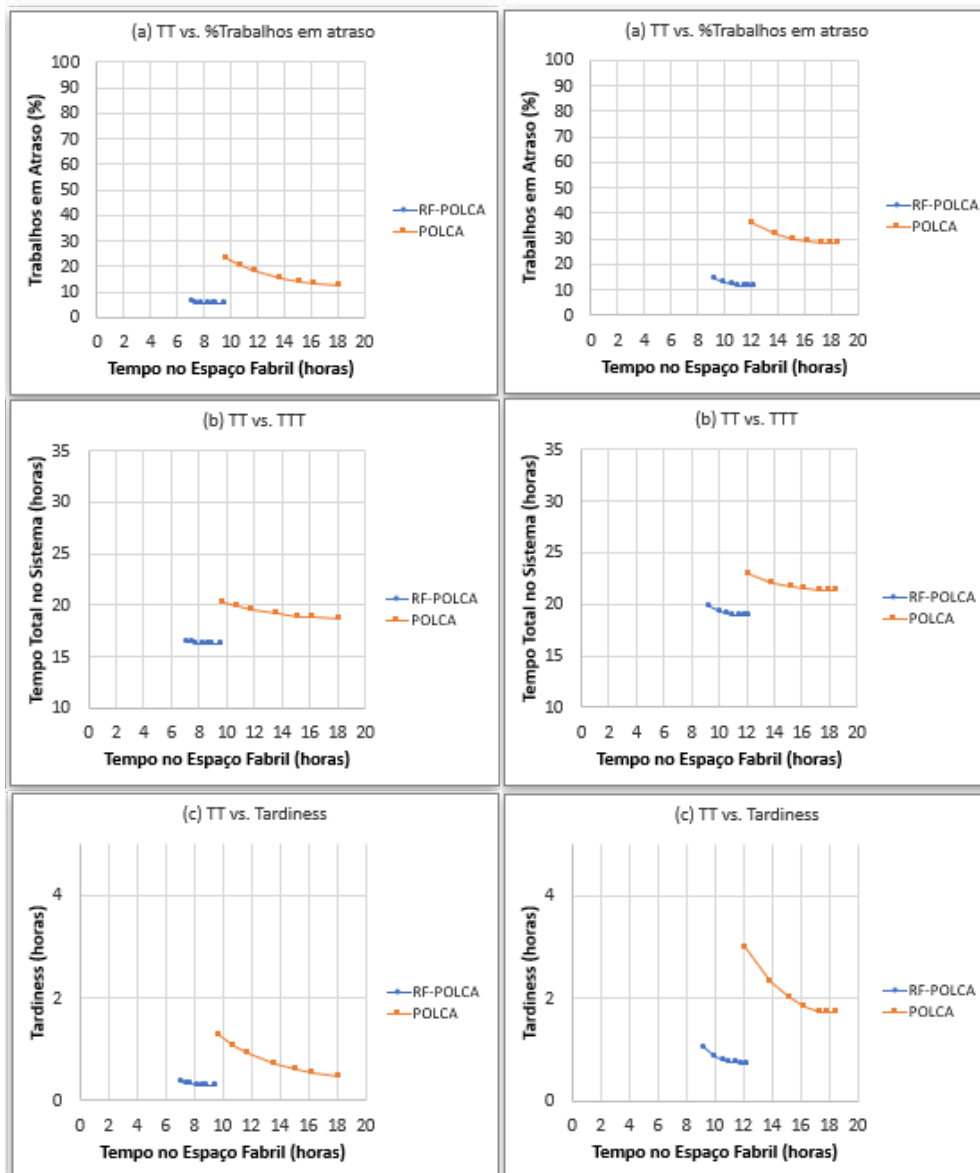


Figura 32 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA num modelo convergente com três estágios, quantum em unidades com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

Da observação dos gráficos da figura 32 pode-se concluir o seguinte:

- O mecanismo RF-POLCA desempenha melhor para todas as medidas consideradas e independentemente do valor de  $CV^2$  considerado, 0,5 ou 0,707. Isto é, resulta em menor percentagem de trabalhos em atraso, menor tempo total no sistema e menor *tardiness* para os diferentes valores de tempo no espaço fabril.
- O desempenho dos mecanismos deteriora-se para nível de variabilidade dos tempos de processamento maiores, i.e., para  $CV^2 = 0,707$ .

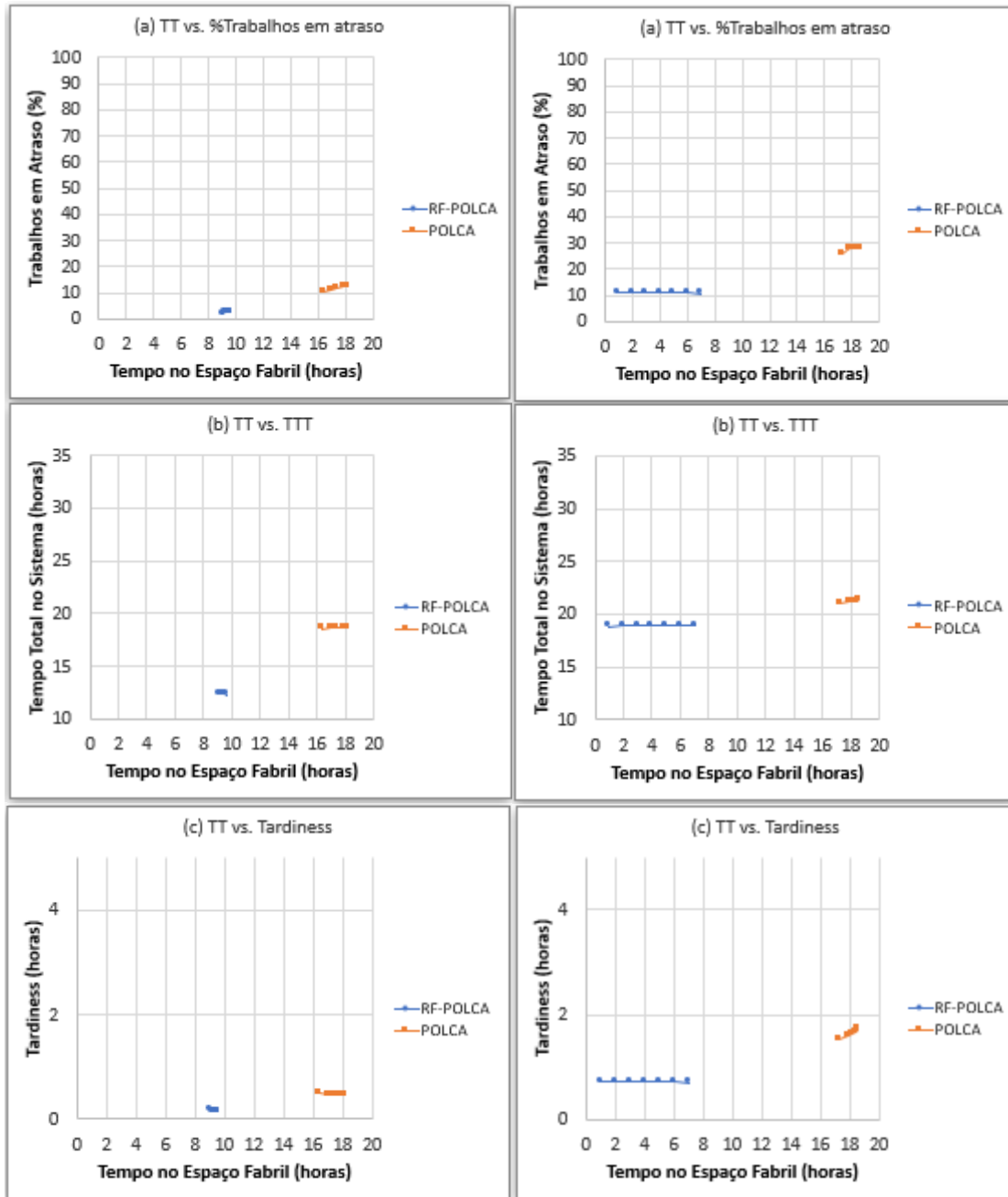


Figura 33 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA num modelo convergente com três estágios, quantum em horas com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

Da observação dos gráficos da figura 33 pode-se concluir o seguinte:

- O desempenho relativo dos dois mecanismos permanece inalterado, i.e. o RF-POLCA desempenha melhor e o desempenho dos mecanismos deteriora-se para nível de variabilidade dos tempos de processamento maiores.

#### 4.2.2 Influência do número de células na rota dos trabalhos

Nas figuras 34 e 35, apresentam-se os resultados para a configuração convergente com cinco estágios de produção, para as duas situações estudadas em termos de

variabilidade dos tempos de processamento,  $CV^2 = 0,5$  e  $CV^2 = 0,707$ . Na figura 34 encontram-se os resultados para um *quantum* em unidades e na figura 35 para um *quantum* em horas.

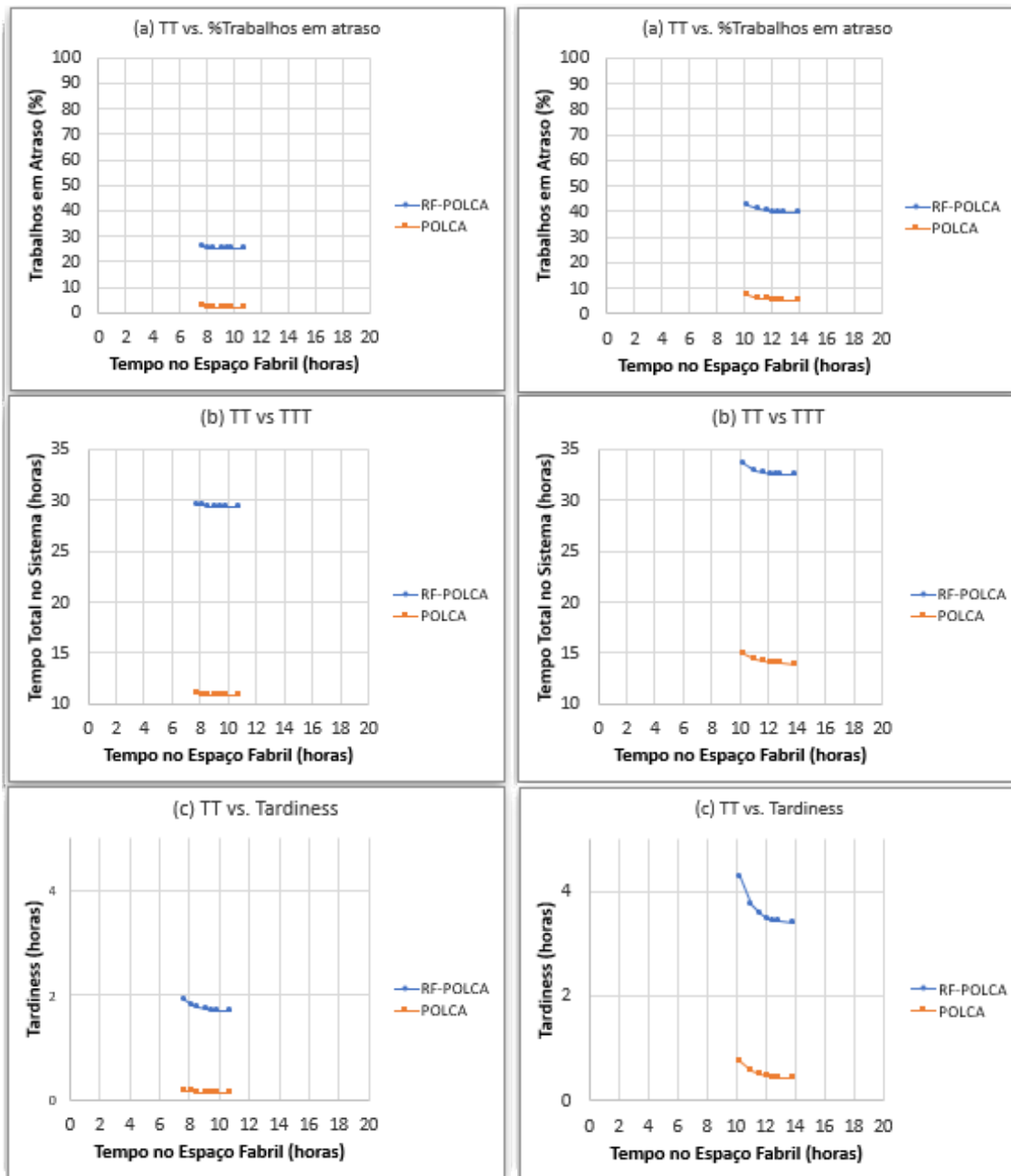


Figura 34 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA num modelo convergente com cinco estágios, quantum em unidades com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

Da análise dos gráficos da figura 34 concluiu-se que:

- O desempenho relativo dos mecanismos altera-se, i.e., o POLCA passa a apresentar melhor desempenho que o RF-POLCA, para todas as medidas consideradas. O controlo baseado no elemento *push*, i.e em datas de autorização, apenas na primeira célula parece deixar de ser suficiente quando a dimensão das rotas dos trabalhos é maior.

- O comportamento das curvas dos mecanismos é idêntico nos dois níveis de variabilidade considerados, ainda que o desempenho relativo do RF-POLCA deteriore para  $CV^2 = 0,707$ .

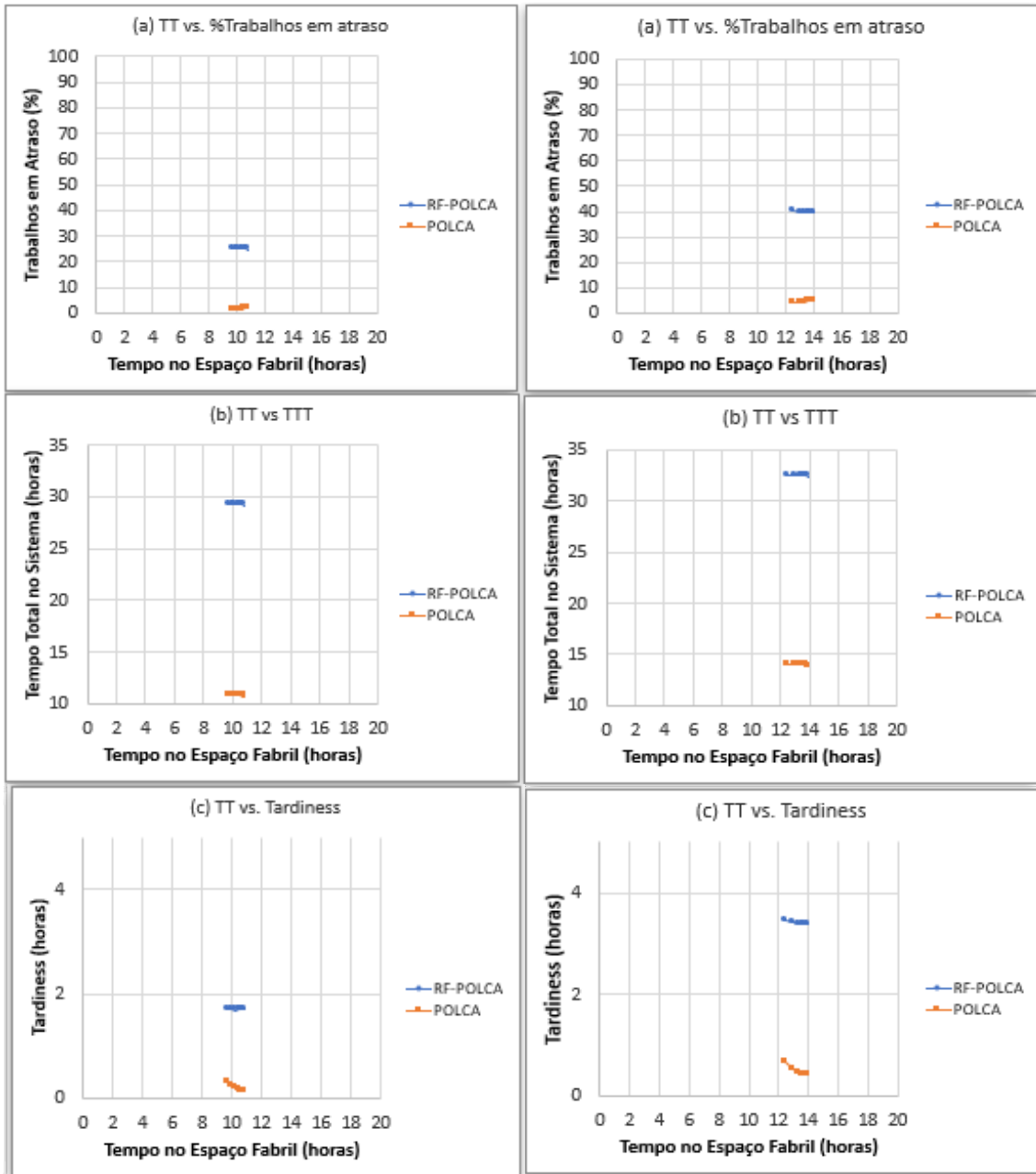


Figura 35 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA num modelo convergente com cinco estágios, quantum em horas com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

Da análise dos gráficos da figura 35 pode-se concluir que:

- Os resultados confirmam o desempenho observado quando o *quantum* é em unidades, i.e., o POLCA desempenha melhor. O comportamento das curvas dos mecanismos é idêntico nos dois níveis de variabilidade considerados, ainda que o desempenho relativo do RF-POLCA deteriore para  $CV^2 = 0,707$ .

### 4.3 Configuração Divergente

#### 4.3.1 Influência da variabilidade nos tempos de processamento

Na figura 36 e 37, encontram-se os resultados para a configuração divergente com três estágios produtivos, para as duas situações de variabilidade dos tempos de processamento,  $CV^2 = 0,5$  e  $CV^2 = 0,707$ . Na figura 36 encontram-se os resultados para um POLCA *quantum* em unidades e na figura 37 para um *quantum* em horas.

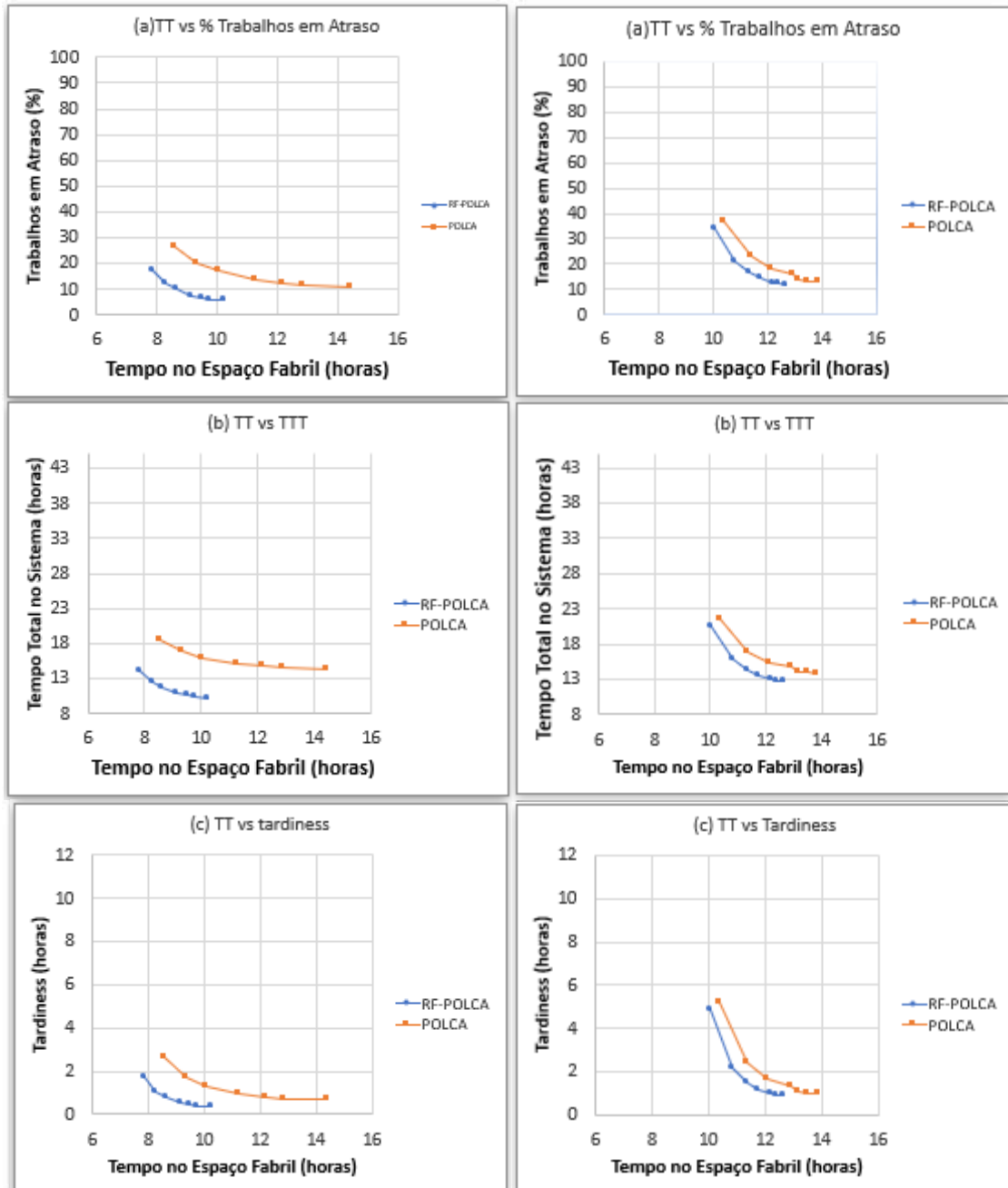


Figura 36 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA num modelo divergente com três estágios, quantum em unidades com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

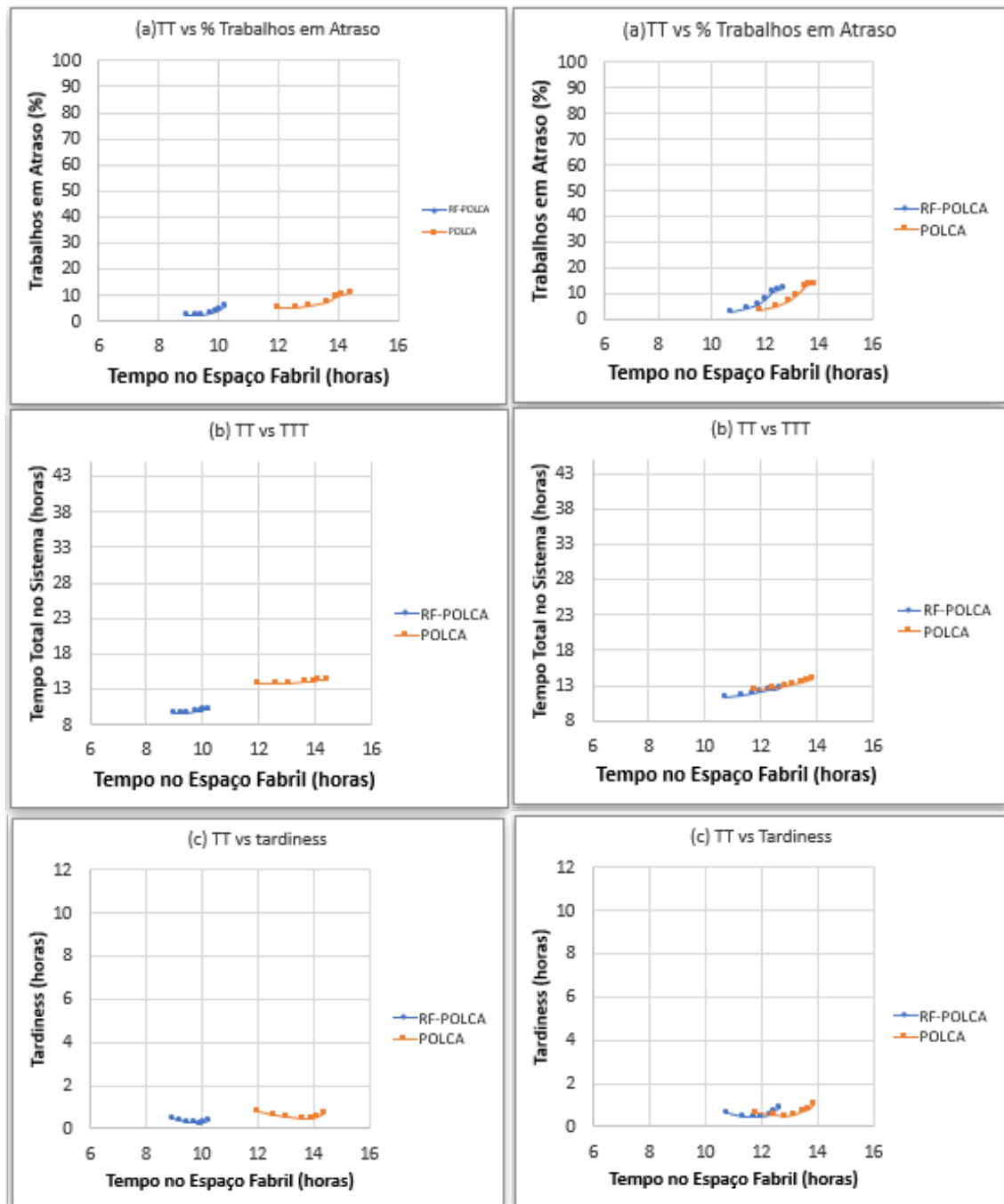


Figura 37 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA num modelo divergente com três estágios, quantum em horas com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

Da observação dos gráficos da figura 36 pode-se concluir o seguinte:

- O mecanismo RF-POLCA apresenta um melhor desempenho, comparativamente ao POLCA, para todas as medidas consideradas. Ou seja, resulta numa menor percentagem de trabalhos em atraso, num menor tempo no sistema e num menor *tardiness* para os diferentes números de cartões POLCA usados.
- Ainda que o desempenho do mecanismo RF-POLCA seja melhor para ambos os valores do coeficiente de variação testados, nota-se que as curvas dos dois

mecanismos se aproximam quando a variabilidade é maior, i.e.,  $CV^2 = 0,707$ , particularmente para o tempo total no sistema.

- O desempenho de ambos os mecanismos, deteriora para níveis de variabilidade mais elevados, como seria de esperar e também observado nas restantes configurações.

Da observação dos gráficos da figura 37 pode-se concluir que:

- Os resultados obtidos com um *quantum* em horas confirmam o desempenho observado quando o *quantum* é referente a unidades, ou seja, o mecanismo RF-POLCA desempenha melhor que o POLCA, ainda que as curvas dos dois mecanismos se aproximem quando a variabilidade é maior, ou seja,  $CV^2 = 0,707$ .

#### 4.3.2 Influência do número de células na rota dos trabalhos

Nas figuras 38 e 39, encontram-se os resultados para a configuração divergente com cinco estágios de produção, para as duas situações estudadas em termos de variabilidade dos tempos de processamento,  $CV^2 = 0,5$  e  $CV^2 = 0,707$ . Na figura 38 estão os resultados para um *quantum* em unidades e na figura 39 para um *quantum* em horas.

A partir da análise dos gráficos da figura 38, é possível concluir o seguinte:

- O desempenho de ambos os mecanismos, parece deteriorar-se consideravelmente quando o número de cartões é restringido e quando a dimensão das rotas dos trabalhos é grande. Tal como observado por Farnoush & Wiktorsson (2013), a configuração divergente poderá resultar numa célula a produzir trabalhos para um dos ramos, enquanto o outro se encontra em *starvation*.
- Ainda assim o desempenho do POLCA é melhor que o do RF-POLCA para ambas as situações de variabilidade, nos tempos de processamento, que foram consideradas.

Da análise dos gráficos da figura 39 pode-se concluir que:

- Os resultados obtidos com um *quantum* em horas confirmam: (i) que o desempenho de ambos os mecanismos deteriora consideravelmente quando o número de cartões é restringido; (ii) o mecanismo POLCA desempenha ainda assim relativamente melhor que o RF-POLCA.

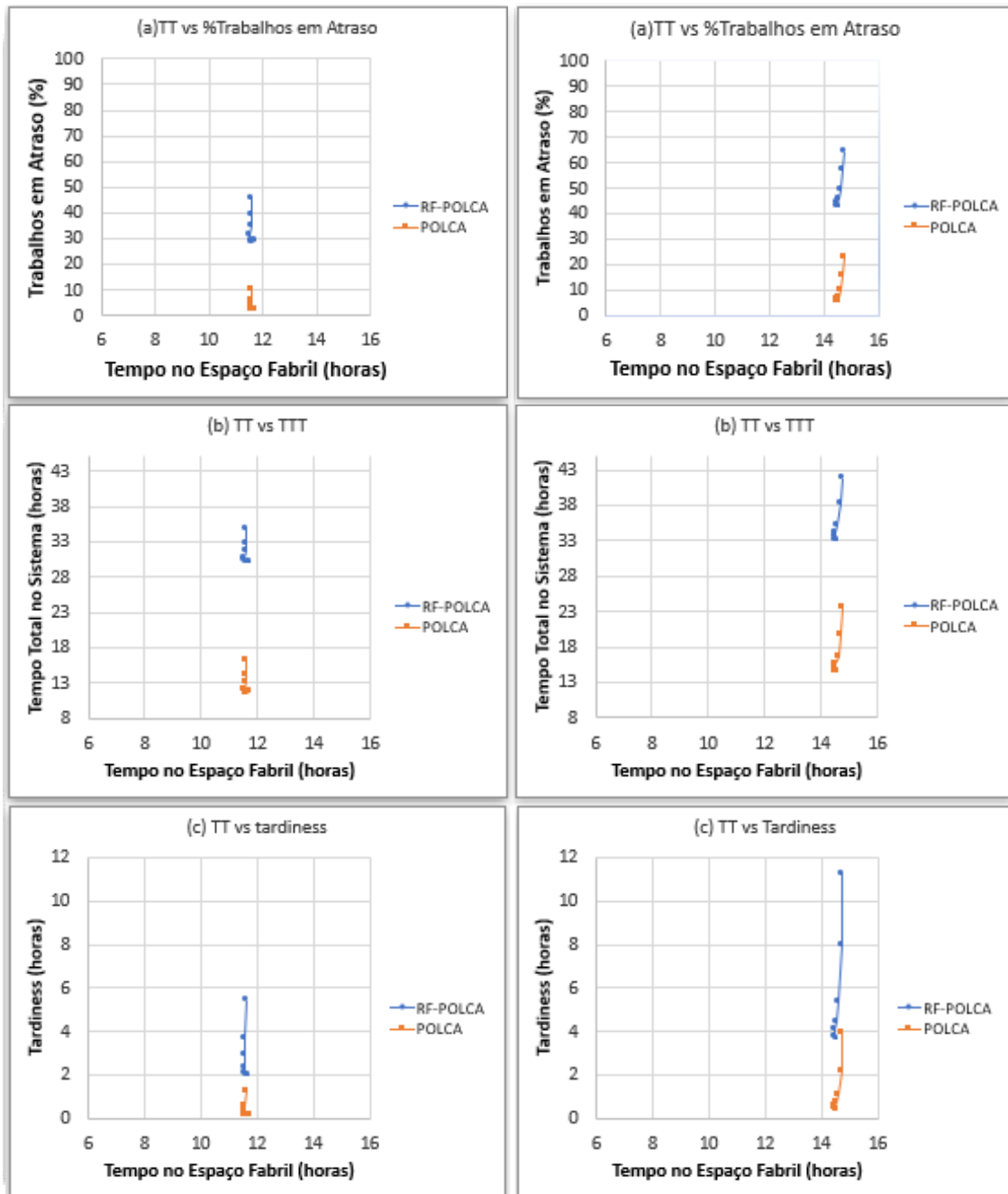


Figura 38 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA num modelo divergente com cinco estágios, quantum em unidades com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

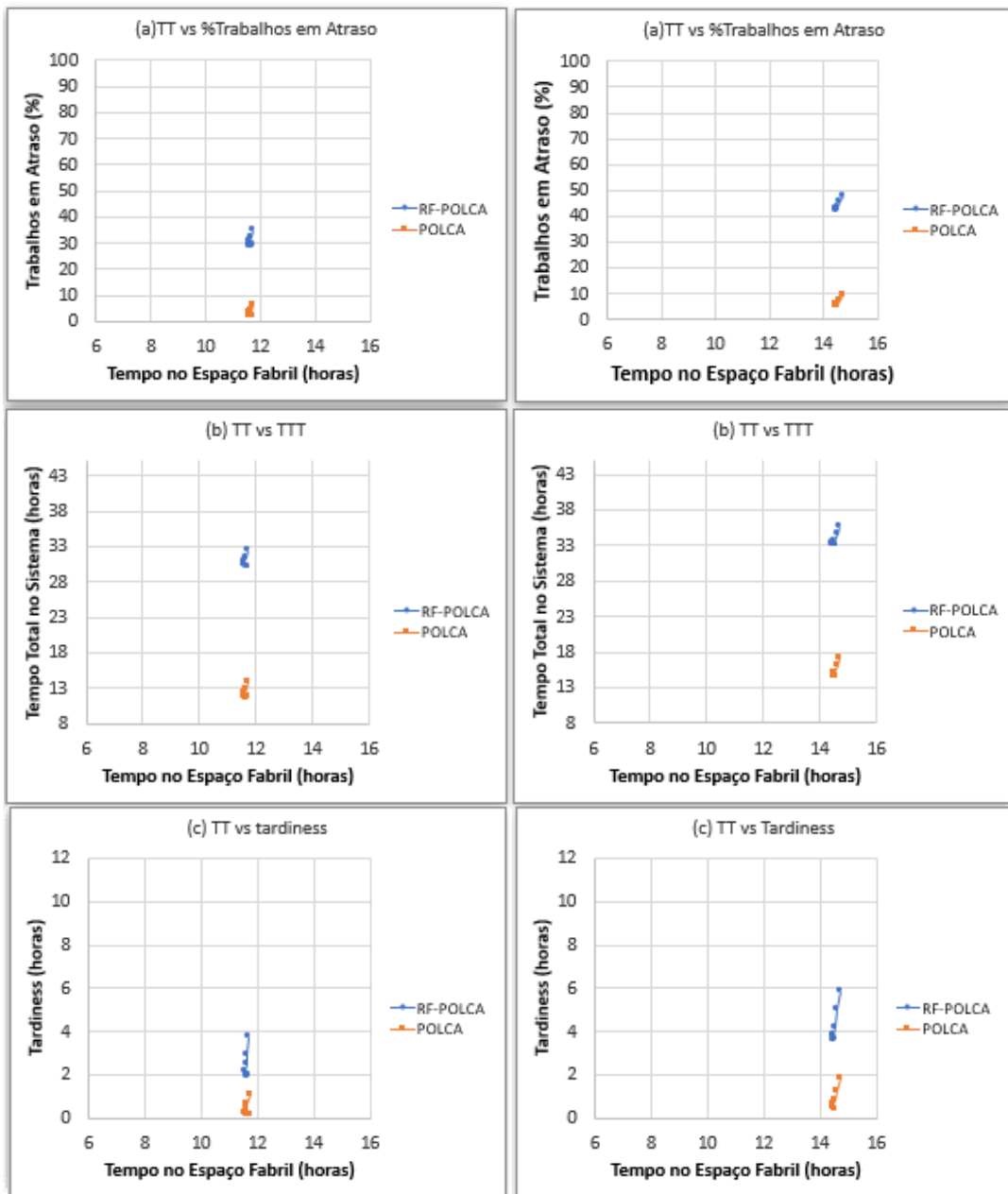


Figura 39 - Desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA num modelo divergente com cinco estágios, quantum em horas com  $CV^2 = 0,5$  (à esquerda) e  $CV^2 = 0,707$  (à direita)

# 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

5.2 Proposta de Trabalhos Futuros



## 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

O trabalho apresentado nesta dissertação avalia o desempenho dos mecanismos POLCA e RF-POLCA em diferentes cenários produtivos.

O trabalho iniciou-se com uma revisão da literatura que permitiu conhecer melhor o modo de operação dos mecanismos e os estudos realizados, além de terem sido identificados algumas condições que, pelo menos em teoria, segundo Rajan Suri, condicionariam a aplicação do RF-POLCA.

Suri indicou alguns fatores que poderiam limitar a aplicabilidade do RF-POLCA, nomeadamente: (i) trabalhos com rotas longas, envolvendo quatro ou mais células, para serem processados; (ii) a ocorrência de muitas interseções entre os *loops* POLCA levando a que a regra de despacho *First-Come First-Serve*, não seja suficiente para ordenar os trabalhos adequadamente e (iii) a variabilidade da carga que os trabalhos impõem nas células determinada pelos seus tempos de processamento.

De forma a testar a influência destes fatores no desempenho dos mecanismos, considerou-se no plano experimental realizado a influência: (i) do número de estágios produtivos (ou células) na rota dos trabalhos, nomeadamente 3 e 5; (ii) a configuração do sistema de produção, em linha, convergente e divergente, e (iii) o grau de variabilidade dos tempos de processamento traduzido em dois valores dos Coeficientes de Variação.

O RF-POLCA apesar de ser um mecanismo mais simples que o POLCA, mostrou que na maioria dos cenários experimentais considerados, desempenha melhor. Contudo o desempenho do RF-POLCA mostrou deteriora-se mais do que o do POLCA para situações de maior variabilidade. No caso de rotas longas, a diferença de desempenho entre o RF-POLCA e o POLCA aumentou, como se verificou na configuração em linha.

Nas configurações convergente e divergente, os resultados alteram-se na presença de rotas longas e passa a ser o POLCA a desempenhar melhor. Contudo nestas configurações existe a influência de um segundo fator, um elevado número de interseções entre *loops*.

Por outro lado o uso de um *quantum* em horas associado aos cartões revelou conduzir a um desempenho superior em termos da percentagem de trabalhos em atraso, comparativamente ao *quantum* em unidades, particularmente quando o coeficiente de variação do tempo de processamento é maior e as rotas são mais longas.

De uma forma geral os resultados obtidos confirmam os pressupostos de Suri no que concerne ao desempenho relativo do RF-POLCA, que tende a deteriorar-se com a variabilidade e a dimensão da rota dos trabalhos, deteriorando-se particularmente quando a dimensão da rota é conjugada com elevadas interseções entre *loops*. Contudo, o RF-POLCA tende a desempenhar melhor que o POLCA para a maioria dos cenários considerados, aparentemente confirmando os resultados de Thurer et al (2019) em que a adição de datas de autorização em todas as células deteriora o desempenho.

## 5.2 *Propostas de trabalhos futuros*

Como trabalho futuro, uma das sugestões poderia incidir na comparação destes dois mecanismos com outros baseados em cartões. Seria também interessante estudar a aplicação prática destes dois mecanismos num contexto real para comparar com este estudo teórico. Poderia ser vantajoso estender a gama de coeficientes de variação testados e dimensões das rotas dos produtos. Também era proveitoso o estudo de outras regras de despacho, para além do FCFS sugerido. Por fim, sugere-se averiguar o impacto do único pressuposto de Rajan Suri que não foi abordado nesta dissertação, em que a alteração das datas de entrega dos trabalhos, após serem lançados em produção, poderá limitar a aplicação do RF-POLCA.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



## Referências Bibliográficas

Aziz, M. H., Bohez, E. L. J., Pisuchpen, R., & Parnichkun, M. (2013). Petri Net model of repetitive push manufacturing with Polca to minimise value-added WIP. *International Journal of Production Research*, 51(15), 4464–4483. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.765073>.

Bagni, G., Godinho Filho, M., Thürer, M., & Stevenson, M. (2020). Systematic review and discussion of production control systems that emerged between 1999 and 2018. *Production Planning and Control*, 0(0), 1–15. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1742398>.

Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2005). DISCRETE-EVENT SYSTEM DISCRETE-EVENT SYSTEM Third Edition.

Braglia, M., Castellano, D., & Frosolini, M. (2014). Optimization of POLCA-controlled production systems with a simulation-driven genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1–4), 385–395. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5282-5>.

Ching, H. W., Bong, C. S. & Chong, K. E. (2015). Development of POLCA Simulation Model in a Job Shop Manufacturing Environment.

Eng, C. K., Ching, H. W., & Siong, B. C. (2015). Paired-cell overlapping loops of cards with authorization simulation in job shop environment. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 15(3), 68–73.

Enrique Ares, Gustavo Pelaez, Luis Pinto Ferreira, Daniel Prieto, Antonio Chao, “Optimisation of a Production Line using Simulation and Lean Techniques”, in Proceedings of the Operational Research Society Simulation Workshop 2012 (SW12), 27-28 March 2012, Birmingham, England.

Farnoush, A., & Wiktorsson, M. (2013). POLCA and CONWIP performance in a divergent production line: An automotive case study. *Journal of Management Control*, 24(2), 159–186. <https://doi.org/10.1007/s00187-013-0177-z>.

Fernandes, N. O., & do Carmo-Silva, S. (2006). Generic POLCA-A production and materials flow control mechanism for quick response manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 104(1), 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.07.003>.

- Fernandes, N. O., Thüerer, M., Mirzaei, N., Ferreira, L. P., Silva, F. J. G., & Carmo-Silva, S. (2020). POLCA Control in two-stage production systems. *Procedia Manufacturing*, 51(2019), 1491–1496. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.207>.
- Fernandes, N. O., Thüerer, M., Mirzaei, N., Ferreira, L. P., Silva, F. J. G., & Carmo-Silva, S. (2020). POLCA Control in two-stage production systems. *Procedia Manufacturing*, 51(2019), 1491–1496. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.207>.
- Ferreira L.P., Gómez E.A., Lourido G.P., Tjahjono B. (2013) Modeling a Complex Production Line Using Virtual Cells. In: Ao Si., Gelman L. (eds) *Electrical Engineering and Intelligent Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 130. 361-373. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2317-1\\_30](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2317-1_30)
- Ferreira, [uis; E. Ares, G[omez]; G.C Pelaez, L[ourido] & Salgado, M[arina] (2010). Analysis of the Influence of Conveyor Speed on the Behaviour of an Automobile Assembly Line, Chapter 41 in DAAAM International Scientific Book 2010, pp. 463-470, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-901509-74-2, ISSN 1726-9687, Vienna, Austria DOI:10.2507/daaam.scibook.2010.41
- Ferreira, L. P., Ares, E., Peláez, G., Tjahjono, B., & Areal, J. J. (2012). Production Planning and Control in an Automobile Closed-Loops Assembly Line. *Key Engineering Materials*, 502, 103–108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.502.103>
- Ferreira, L. P., Gómez, E. A., Lourido, G. P., & Tjahjono, B. (2011). Optimization of a multiphase multiproduct production line based on virtual cells. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011, WCE 2011*, 1, 616–621.
- Frazeo, T., & Standridge, C. (2016). Conwip versus POLCA: A comparative analysis in a high-mix, low-volume (HMLV) manufacturing environment with batch processing. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(2), 432–449. <https://doi.org/10.3926/jiem.1248>.
- Germes, R., & Riezebos, J. (2010). Workload balancing capability of pull systems in MTO production. *International Journal of Production Research*, 48(8), 2345–2360. <https://doi.org/10.1080/00207540902814314>.
- Gómez Paredes, F. J., & Godinho Filho, D. M. (2017). Lean e QRM: diferentes ou semelhantes? Revisão da literatura. *Exacta*, 15(1), 137–154. <https://doi.org/10.5585/exactaep.v15n1.6844>.
- Harrod, S., & Kanet, J. J. (2013). Applying work flow control in make-to-order job shops. *International Journal of Production Economics*, 143(2), 620–626. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.02.017>.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2004). To pull or not to pull: What is the question? *Manufacturing and Service Operations Management*, 6(2), 133–148. <https://doi.org/10.1287/msom.1030.0028>.

Kabadurmus, O. (2009). A comparative study of POLCA and generic CONWIP production control systems in erratic demand conditions. IIE Annual Conference. Proceedings. 1197-1202.

Krishnamurthy, A., & Suri, R. (2009). Planning and implementing POLCA: A card-based control system for high variety or custom engineered products. *Production Planning and Control*, 20(7), 596–610. <https://doi.org/10.1080/09537280903034297>.

Krishnamurthy, A., & Suri, R. (2009). Planning and implementing POLCA: A card-based control system for high variety or custom engineered products. *Production Planning and Control*, 20(7), 596–610. <https://doi.org/10.1080/09537280903034297>.

Luis Pinto Ferreira, Enrique Ares Gómez, Gustavo C. Peláez Lourido, José Diéguez Quintas, Benny Tjahjono. Analysis and optimisation of a network of closed-loop automobile assembly line using simulation. *Int J Adv Manuf Technol* 59, 351–366 (2012) doi:10.1007/s00170-011-3502-4

M. Naderi, E. Ares, G. Peláez, D. Prieto, A. Fernández, Luís Pinto Ferreira, “The Sustainable Evaluation of Manufacturing Systems Based on Simulation Using an Economic Index Function: A Case Study”, The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2017, *Procedia Manufacturing* 13 (2017) 1043 – 1050, Elsevier

Mussons, Sergi (2021). Quick Response Manufacturing vs Lean Manufacturing. QRM Institute. Disponível em: <https://qrminstitute.org/quick-response-manufacturing-vs-lean-manufacturing>. Acesso em: 17 out. 2021.

Powell, D. J., & Strandhagen, J. O. (2012). 21st Century operational excellence: Addressing the similarities and differences between Lean production, Agility and QRM. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 449–453. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2012.6837779>.

Riezebos, J. (2010). Design of POLCA material control systems. *International Journal of Production Research*, 48(5), 1455–1477. <https://doi.org/10.1080/00207540802570677>.

Severino, M. R., & Godinho Filho, M. (2019). POLCA system for supply chain management: simulation in the automotive industry. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(3), 1271–1289. <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1323-5>.

Silva, C., Reis, V., Morais, A., Brilenkov, I., Vaza, J., Pinheiro, T., Neves, M., Henriques, M., Varela, M. L., Pereira, G., Dias, L., Fernandes, N. O., & Carmo-Silva, S. (2017). A comparison of production control systems in a flexible flow shop. *Procedia Manufacturing*, 13, 1090–1095. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.169>.

Silva, Ferreira LP, Silva FJG, Tjahjono B, Ávila P. Simulation-Based Decision Support System to Improve Material Flow of a Textile Company. *Sustainability*. 2021; 13(5):2947. <https://doi.org/10.3390/su13052947> (Special Issue "Manufacturing and Management Paradigms, Methods and Tools for Sustainable Industry 4.0 oriented Manufacturing Systems")

Stevenson, M., Hendry, L. C., & Kingsman, B. G. (2005). A review of production planning and control: The applicability of key concepts to the make-to-order industry. *International Journal of Production Research*, 43(5), 869–898. <https://doi.org/10.1080/0020754042000298520>.

Suri, R. (1998). *Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead Times* (1st ed.). Productivity Press. <https://doi.org/10.4324/9780367804909>.

Suri, R. (2010). *It's about time: the competitive advantage of quick response manufacturing*. New York: Productivity Press.

Suri, R. (2018). The Practitioner's Guide to POLCA. In *The Practitioner's Guide to POLCA*. <https://doi.org/10.4324/9781351170765>.

Suri. (2003). QRM and POLCA: A Winning Combination for Manufacturing Enterprises in the 21st Century 21st Century Markets Are Here. [Technical Report, Center for Quick Response Manufacturing, May 2003], May, 30.

Thürer, M., Fernandes, N. O., & Stevenson, M. (2020). Material Flow Control in High-Variety Make-to-Order Shops: Combining COBACABANA and POLCA. *Production and Operations Management*, 29(9), 2138–2152. <https://doi.org/10.1111/poms.13218>.

Thürer, M., Fernandes, N. O., Stevenson, M., Silva, C., & Carmo-Silva, S. (2019). POLCA-A: an assessment of POLCA's authorization element. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(6), 2435–2447. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1402-2>.

Vandaele, N., Claerhout, D., Van Nieuwenhuysse, I. and Cremmery, R. (2005) E-POLCA to Control Multi-product, Multi-machine Job Shops, UA.

Vandaele, N., Van Nieuwenhuysse, I., Claerhout, D., & Cremmery, R. (2008). Load-based POLCA: An integrated material control system for multiproduct, multimachine job shops. *Manufacturing and Service Operations Management*, 10(2), 181–197. <https://doi.org/10.1287/msom.1070.0174>.

Wang, W., Khalid, Q. S., Abas, M., Li, H., Azim, S., Babar, A. R., Saleem, W., & Khan, R. (2021). Implementation of POLCA integrated QRM framework for optimized production performance-A case study. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063452>.

# APÊNDICE



## APÊNDICE

**Modelo em linha de 3 estágios  $CV^2=0,5$**   
**Quantum em Unidades**

|                 | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT              | 15,15          | 13,557 | 13,035 | 12,351 | 11,443 | 10,881 | 10,232 |
| TTT             | 15,15          | 15,219 | 15,284 | 15,475 | 15,973 | 16,503 | 17,451 |
| %Atraso         | 18,759         | 18,996 | 19,196 | 19,796 | 21,235 | 22,793 | 25,374 |
| Tardiness       | 1,5838         | 1,627  | 1,6651 | 1,7796 | 2,0877 | 2,4257 | 3,052  |

|              | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT           | 17,958         | 16,026 | 15,35  | 14,432 | 13,175 | 12,38  | 11,458 |
| TTT          | 17,958         | 18,028 | 18,099 | 18,315 | 18,903 | 19,524 | 20,611 |
| %Atraso      | 23,556         | 23,796 | 24,018 | 24,743 | 26,638 | 28,535 | 31,705 |
| Tardiness    | 1,9348         | 1,9848 | 2,0322 | 2,1823 | 2,5835 | 3,0138 | 3,7866 |

## Modelo em linha de 3 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Horas

|                 | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT              | 15,15          | 13,686 | 13,191 | 12,555 | 11,694 | 11,175 | 10,578 |
| TTT             | 15,15          | 14,945 | 14,909 | 15,025 | 15,381 | 16,021 | 17,475 |
| %Atraso         | 18,759         | 17,475 | 16,211 | 15,142 | 14,008 | 14,645 | 16,772 |
| Tardiness       | 1,5838         | 1,3905 | 1,3955 | 1,55   | 1,9719 | 2,5574 | 3,7624 |

|              | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT           | 17,958         | 16,164 | 15,529 | 14,666 | 13,494 | 12,772 | 11,922 |
| TTT          | 17,968         | 17,648 | 17,584 | 17,612 | 18,034 | 18,761 | 20,286 |
| %Atraso      | 23,556         | 22,11  | 20,591 | 18,699 | 17,311 | 18,106 | 20,207 |
| Tardiness    | 1,9348         | 1,6596 | 1,6516 | 1,7749 | 2,3198 | 3,0178 | 4,3674 |

## Modelo em linha de 3 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Unidades

|                 | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT              | 20,506         | 19,11  | 18,323 | 17,097 | 16,241 | 15,17  | 13,814 |
| TTT             | 20,506         | 20,638 | 20,871 | 21,659 | 22,753 | 25,114 | 30,967 |
| %Atraso         | 35,426         | 35,782 | 36,308 | 37,981 | 40,021 | 44,1   | 52,553 |
| Tardiness       | 4,1522         | 4,2499 | 4,4243 | 5,0435 | 5,9342 | 7,8859 | 12,897 |

|              | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT           | 20,596         | 19,197 | 18,408 | 17,176 | 16,313 | 15,234 | 13,86  |
| TTT          | 20,596         | 20,728 | 20,961 | 21,744 | 22,841 | 25,217 | 31,066 |
| %Atraso      | 35,571         | 35,925 | 36,456 | 38,129 | 40,166 | 44,28  | 52,694 |
| Tardiness    | 4,1657         | 4,2626 | 4,4381 | 5,0538 | 5,9501 | 7,9181 | 12,94  |

**Modelo em linha de 3 estágios  $CV^2=0,707$**   
Quantum em Horas

|                 | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT              | 20,506         | 19,144 | 18,418 | 17,275 | 16,467 | 15,559 | 14,346 |
| TTT             | 20,506         | 19,988 | 19,811 | 19,74  | 19,862 | 20,934 | 24,099 |
| %Atraso         | 35,426         | 35,609 | 35,299 | 32,447 | 29,594 | 27,606 | 27,536 |
| Tardiness       | 4,1522         | 3,6096 | 3,3979 | 3,3295 | 3,5019 | 4,5669 | 7,5686 |

|              | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT           | 20,596         | 19,232 | 18,5   | 17,361 | 16,563 | 15,613 | 14,346 |
| TTT          | 20,596         | 20,07  | 19,89  | 19,817 | 19,953 | 20,761 | 23,501 |
| %Atraso      | 35,571         | 35,741 | 35,421 | 32,538 | 29,854 | 27,459 | 26,733 |
| Tardiness    | 4,1657         | 3,617  | 3,4066 | 3,3315 | 3,5145 | 4,3534 | 7,0354 |

## Modelo em linha de 5 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Unidades

|                 | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT              | 21,353         | 19,69  | 19,135 | 18,393 | 17,371 | 16,715 | 15,951 |
| TTT             | 21,353         | 21,411 | 21,486 | 21,694 | 22,287 | 22,961 | 24,293 |
| %Atraso         | 14,393         | 14,53  | 14,725 | 15,294 | 16,767 | 18,478 | 21,519 |
| Tardiness       | 1,4317         | 1,4629 | 1,5026 | 1,6031 | 1,905  | 2,2695 | 3,0384 |

|              | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT           | 30,884         | 28,934 | 28,156 | 26,917 | 24,747 | 23,075 | 20,955 |
| TTT          | 30,884         | 30,966 | 31,071 | 31,355 | 32,173 | 33,086 | 34,756 |
| %Atraso      | 30,315         | 30,546 | 30,904 | 31,853 | 34,56  | 37,408 | 42,333 |
| Tardiness    | 2,4513         | 2,5182 | 2,6013 | 2,8247 | 3,4711 | 4,1979 | 5,5497 |

## Modelo em linha de 5 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Horas

|                 | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT              | 21,353   | 19,703 | 19,143 | 18,41  | 17,43  | 16,819 | 16,163 |
| TTT             | 21,353   | 20,967 | 20,9   | 20,954 | 21,497 | 22,462 | 25,74  |
| %Atraso         | 14,393   | 12,494 | 11,575 | 10,554 | 10,37  | 11,155 | 14,853 |
| Tardiness       | 1,4317   | 1,1878 | 1,2204 | 1,3877 | 1,9793 | 2,8152 | 5,5367 |

|              | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT           | 26,162   | 24,508 | 23,931 | 23,134 | 22,063 | 21,349 | 20,23  |
| TTT          | 26,162   | 25,773 | 25,684 | 25,708 | 26,32  | 27,72  | 31,459 |
| %Atraso      | 17,772   | 15,746 | 14,563 | 13,26  | 12,986 | 15,088 | 20,809 |
| Tardiness    | 1,6132   | 1,3575 | 1,3908 | 1,5974 | 2,3598 | 3,5946 | 6,6735 |

## Modelo em linha de 5 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Unidades

|                 | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT              | 30,048         | 28,613 | 27,769 | 26,386 | 25,383 | 24,062 | 22,309 |
| TTT             | 30,048         | 30,188 | 30,493 | 31,579 | 33,046 | 36,856 | 49,033 |
| %Atraso         | 36,506         | 36,822 | 37,433 | 39,507 | 42,044 | 47,595 | 59,698 |
| Tardiness       | 4,9665         | 5,0633 | 5,2969 | 6,135  | 7,2739 | 10,401 | 21,062 |

|              | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT           | 32,476         | 31,031 | 30,16  | 28,676 | 27,553 | 25,979 | 23,655 |
| TTT          | 32,476         | 32,61  | 32,904 | 33,955 | 35,361 | 39,134 | 51,285 |
| %Atraso      | 39,267         | 39,58  | 40,205 | 42,177 | 44,692 | 50,422 | 62,646 |
| Tardiness    | 5,1781         | 5,2817 | 5,5225 | 6,3995 | 7,5711 | 10,831 | 21,87  |

## Modelo em linha de 5 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Horas

|                 | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT              | 30,048         | 28,299 | 27,377 | 25,887 | 24,928 | 23,745 | 22,164 |
| TTT             | 30,048         | 29,133 | 28,781 | 28,39  | 28,694 | 29,953 | 38,333 |
| %Atraso         | 36,506         | 35,713 | 34,028 | 30,5   | 28,164 | 25,657 | 29,256 |
| Tardiness       | 4,9665         | 4,1066 | 3,8107 | 3,5972 | 4,0279 | 5,3614 | 13,042 |

|              | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT           | 32,476         | 30,743 | 29,786 | 28,261 | 27,21  | 25,917 | 24,014 |
| TTT          | 32,476         | 31,579 | 31,188 | 30,738 | 30,867 | 32,075 | 40,664 |
| %Atraso      | 39,267         | 38,521 | 36,877 | 32,989 | 30,395 | 27,568 | 31,765 |
| Tardiness    | 5,1781         | 4,3236 | 3,995  | 3,7545 | 4,0896 | 5,5053 | 13,736 |

## Modelo Convergente de 3 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Unidades

|                 | <b>Cartões</b> |         |         |         |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 16      | 14      | 12      | 10      | 9       | 8       |
| TT              | 9,5902         | 8,9748  | 8,7151  | 8,3492  | 7,8331  | 7,5037  | 7,1138  |
| TTT             | 16,217         | 16,224  | 16,233  | 16,256  | 16,315  | 16,383  | 16,5    |
| %Atraso         | 5,2914         | 5,307   | 5,3353  | 5,4068  | 5,5962  | 5,804   | 6,1697  |
| Tardiness       | 0,2943         | 0,29666 | 0,29963 | 0,30551 | 0,32026 | 0,33541 | 0,36131 |

|              | <b>Cartões</b> |         |         |         |         |        |        |
|--------------|----------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 16      | 14      | 12      | 10      | 9      | 8      |
| TT           | 18,123         | 16,228  | 15,166  | 13,695  | 11,847  | 10,813 | 9,7275 |
| TTT          | 18,74          | 18,814  | 18,935  | 19,174  | 19,571  | 19,861 | 20,237 |
| %Atraso      | 12,451         | 12,965  | 13,8    | 15,53   | 18,378  | 20,495 | 23,184 |
| Tardiness    | 0,4818         | 0,52494 | 0,59009 | 0,71546 | 0,92317 | 1,0788 | 1,2834 |

## Modelo Convergente de 3 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Horas

|                 | Cartões  |         |         |         |         |         |         |
|-----------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 16      | 14      | 12      | 10      | 9       | 8       |
| TT              | 9,5818   | 9,5533  | 9,5207  | 9,4566  | 9,3235  | 9,2076  | 9,046   |
| TTT             | 12,465   | 12,466  | 12,466  | 12,47   | 12,473  | 12,472  | 12,475  |
| %Atraso         | 2,703    | 2,7064  | 2,701   | 2,6925  | 2,5491  | 2,3997  | 2,1951  |
| Tardiness       | 0,14967  | 0,14978 | 0,14921 | 0,14925 | 0,15096 | 0,15754 | 0,17257 |

|              | Cartões  |         |         |         |         |         |        |
|--------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 16      | 14      | 12      | 10      | 9       | 8      |
| TT           | 18,123   | 18,079  | 18,013  | 17,844  | 17,403  | 16,98   | 16,353 |
| TTT          | 18,74    | 18,739  | 18,737  | 18,73   | 18,702  | 18,677  | 18,662 |
| %Atraso      | 12,451   | 12,449  | 12,449  | 12,425  | 11,967  | 11,271  | 10,203 |
| Tardiness    | 0,4818   | 0,48129 | 0,47899 | 0,47197 | 0,45295 | 0,45116 | 0,4896 |

## Modelo Convergente de 3 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Unidades

|                 | Cartões  |         |         |        |        |         |        |
|-----------------|----------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 24      | 20      | 16     | 14     | 12      | 10     |
| TT              | 12,246   | 11,865  | 11,557  | 11,013 | 10,6   | 10,051  | 9,3296 |
| TTT             | 18,874   | 18,879  | 18,895  | 18,961 | 19,052 | 19,25   | 19,714 |
| %Atraso         | 11,193   | 11,209  | 11,266  | 11,505 | 11,85  | 12,646  | 14,353 |
| Tardiness       | 0,73955  | 0,74171 | 0,74792 | 0,7722 | 0,8053 | 0,87991 | 1,0554 |

|              | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT           | 18,577   | 17,969 | 17,414 | 16,255 | 15,27  | 13,91  | 12,147 |
| TTT          | 21,338   | 21,342 | 21,364 | 21,483 | 21,679 | 22,091 | 22,912 |
| %Atraso      | 28,287   | 28,293 | 28,36  | 28,809 | 29,692 | 31,745 | 35,827 |
| Tardiness    | 1,7296   | 1,7333 | 1,7525 | 1,8515 | 2,01   | 2,3355 | 2,9819 |

## Modelo Convergente de 3 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Horas

|                 | Cartões  |        |         |         |         |         |         |
|-----------------|----------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 24     | 20      | 16      | 14      | 12      | 10      |
| TT              | 12,246   | 12,239 | 12,22   | 12,158  | 12,088  | 11,959  | 11,709  |
| TTT             | 18,874   | 18,875 | 18,875  | 18,876  | 18,88   | 18,889  | 18,89   |
| %Atraso         | 11,193   | 11,195 | 11,201  | 11,222  | 11,272  | 11,329  | 11,107  |
| Tardiness       | 0,73955  | 0,7408 | 0,74036 | 0,73899 | 0,73707 | 0,73198 | 0,72046 |

|              | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|--------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 24     | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT           | 18,577   | 18,557 | 18,512 | 18,365 | 18,187 | 17,859 | 17,231 |
| TTT          | 21,338   | 21,336 | 21,327 | 21,296 | 21,256 | 21,187 | 21,07  |
| %Atraso      | 28,287   | 28,291 | 28,271 | 28,269 | 28,201 | 27,734 | 25,626 |
| Tardiness    | 1,7296   | 1,7276 | 1,7193 | 1,6885 | 1,6493 | 1,5882 | 1,5235 |

## Modelo Convergente de 5 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Unidades

|                 | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT              | 10,791   | 9,8777 | 9,5549 | 9,1205 | 8,5368 | 8,1747 | 7,757  |
| TTT             | 29,34    | 29,343 | 29,349 | 29,368 | 29,424 | 29,488 | 29,61  |
| %Atraso         | 24,965   | 24,968 | 24,981 | 25,04  | 25,26  | 25,536 | 26,075 |
| Tardiness       | 1,7017   | 1,7041 | 1,7094 | 1,7247 | 1,7684 | 1,817  | 1,9052 |

|              | Cartões  |         |         |         |        |         |        |
|--------------|----------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 16      | 14      | 12      | 10     | 9       | 8      |
| TT           | 10,787   | 9,8725  | 9,5498  | 9,1163  | 8,5334 | 8,1724  | 7,7549 |
| TTT          | 10,787   | 10,79   | 10,795  | 10,813  | 10,868 | 10,933  | 11,054 |
| %Atraso      | 1,978    | 1,9875  | 2       | 2,0366  | 2,1368 | 2,244   | 2,4381 |
| Tardiness    | 0,13185  | 0,13273 | 0,13383 | 0,13697 | 0,1461 | 0,15588 | 0,1750 |

## Modelo Convergente de 5 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Horas

|                 | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 16     | 14     | 12     | 10     | 9      | 8      |
| TT              | 10,791   | 10,679 | 10,593 | 10,445 | 10,18  | 9,9835 | 9,7226 |
| TTT             | 29,34    | 29,341 | 29,343 | 29,347 | 29,348 | 29,355 | 29,366 |
| %Atraso         | 24,965   | 24,988 | 25,01  | 25,058 | 25,121 | 25,133 | 24,992 |
| Tardiness       | 1,7017   | 1,7014 | 1,7014 | 1,7015 | 1,6972 | 1,6984 | 1,7037 |

|              | Cartões  |         |         |         |         |         |         |
|--------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 16      | 14      | 12      | 10      | 9       | 8       |
| TT           | 10,787   | 10,673  | 10,587  | 10,437  | 10,174  | 9,9772  | 9,7172  |
| TTT          | 10,787   | 10,787  | 10,788  | 10,792  | 10,795  | 10,801  | 10,816  |
| %Atraso      | 1,978    | 1,8969  | 1,7871  | 1,6422  | 1,5185  | 1,487   | 1,4874  |
| Tardiness    | 0,13185  | 0,13319 | 0,14107 | 0,16303 | 0,20853 | 0,24618 | 0,30276 |

## Modelo Convergente de 5 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Unidades

|                 | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 20     | 18     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT              | 13,947         | 12,867 | 12,564 | 12,176 | 11,681 | 11,059 | 10,275 |
| TTT             | 32,496         | 32,516 | 32,539 | 32,586 | 32,686 | 32,924 | 33,533 |
| %Atraso         | 39,583         | 39,618 | 39,672 | 39,775 | 40,021 | 40,682 | 42,43  |
| Tardiness       | 3,3942         | 3,4111 | 3,4315 | 3,4724 | 3,558  | 3,7561 | 4,262  |

|              | <b>Cartões</b> |         |         |         |         |         |          |
|--------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 20      | 18      | 16      | 14      | 12      | 10       |
| TT           | 13,939         | 12,859  | 12,555  | 12,169  | 11,679  | 11,055  | 10,27    |
| TTT          | 13,939         | 13,959  | 13,981  | 14,03   | 14,137  | 14,375  | 14,975   |
| %Atraso      | 5,0529         | 5,11    | 5,1685  | 5,2879  | 5,539   | 6,0596  | 7,2958   |
| Tardiness    | 0,41947        | 0,42826 | 0,43589 | 0,45094 | 0,48346 | 0,55395 | 0,734377 |

## Modelo Convergente de 5 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Horas

|                 | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 20     | 18     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT              | 13,947   | 13,784 | 13,696 | 13,56  | 13,348 | 13,019 | 12,509 |
| TTT             | 32,496   | 32,502 | 32,506 | 32,513 | 32,521 | 32,541 | 32,611 |
| %Atraso         | 39,583   | 39,621 | 39,65  | 39,7   | 39,782 | 39,93  | 40,108 |
| Tardiness       | 3,3942   | 3,3985 | 3,4007 | 3,4049 | 3,4078 | 3,4183 | 3,4702 |

|              | Cartões  |         |         |         |         |         |         |
|--------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 20      | 18      | 16      | 14      | 12      | 10      |
| TT           | 13,939   | 13,777  | 13,690  | 13,553  | 13,337  | 13,01   | 12,498  |
| TTT          | 13,939   | 13,946  | 13,951  | 13,957  | 13,964  | 13,989  | 14,048  |
| %Atraso      | 5,0529   | 5,0311  | 4,9446  | 4,7655  | 4,4863  | 4,1655  | 3,9467  |
| Tardiness    | 0,41947  | 0,41776 | 0,42168 | 0,43331 | 0,46088 | 0,52643 | 0,66219 |

## Modelo Divergente de 3 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Unidades

|           | Cartões  |         |         |         |         |        |        |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| RF-POLCA  | Infinito | 16      | 14      | 12      | 10      | 9      | 8      |
| TT        | 10,258   | 9,7534  | 9,5144  | 9,1601  | 8,6317  | 8,2826 | 7,8567 |
| TTT       | 10,258   | 10,398  | 10,543  | 10,874  | 11,675  | 12,549 | 14,179 |
| %Atraso   | 5,7159   | 6,1215  | 6,5374  | 7,4761  | 9,7727  | 12,293 | 17,11  |
| Tardiness | 0,35302  | 0,39575 | 0,43361 | 0,52413 | 0,75835 | 1,052  | 1,6857 |

|           | Cartões  |         |         |         |        |        |        |
|-----------|----------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| POLCA     | Infinito | 16      | 14      | 12      | 10     | 9      | 8      |
| TT        | 14,411   | 12,852  | 12,18   | 11,26   | 10,061 | 9,3524 | 8,574  |
| TTT       | 14,411   | 14,585  | 14,756  | 15,122  | 15,985 | 16,869 | 18,53  |
| %Atraso   | 10,99    | 11,632  | 12,265  | 13,612  | 16,849 | 20,164 | 26,184 |
| Tardiness | 0,66681  | 0,73377 | 0,79691 | 0,93613 | 1,2968 | 1,7097 | 2,591  |

## Modelo Divergente de 3 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Horas

|           | Cartões  |        |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| RF-POLCA  | Infinito | 16     | 14      | 12      | 10      | 9       | 8       |
| TT        | 10,258   | 10,049 | 9,9431  | 9,7651  | 9,4727  | 9,2529  | 8,9719  |
| TTT       | 10,258   | 10,071 | 9,9923  | 9,8756  | 9,7346  | 9,6566  | 9,6339  |
| %Atraso   | 5,7159   | 4,4298 | 3,6393  | 2,9015  | 2,4791  | 2,3952  | 2,5667  |
| Tardiness | 0,35302  | 0,2407 | 0,23614 | 0,25145 | 0,31356 | 0,36394 | 0,46374 |

|           | Cartões  |         |         |         |         |        |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| POLCA     | Infinito | 16      | 14      | 12      | 10      | 9      | 8       |
| TT        | 14,411   | 14,133  | 13,959  | 13,637  | 13,052  | 12,603 | 12,004  |
| TTT       | 14,411   | 14,211  | 14,126  | 13,995  | 13,849  | 13,828 | 13,901  |
| %Atraso   | 10,99    | 10,232  | 9,0424  | 7,3574  | 5,7417  | 5,299  | 5,2344  |
| Tardiness | 0,66681  | 0,50539 | 0,46516 | 0,44591 | 0,50427 | 0,6053 | 0,79187 |

## Modelo Divergente de 3 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Unidades

|                 | Cartões  |         |         |        |        |        |        |
|-----------------|----------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 24      | 20      | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT              | 12,668   | 12,423  | 12,196  | 11,74  | 11,352 | 10,816 | 10,045 |
| TTT             | 12,668   | 12,795  | 12,983  | 13,539 | 14,21  | 15,779 | 20,392 |
| %Atraso         | 11,709   | 12,045  | 12,626  | 14,295 | 16,341 | 21,221 | 34,189 |
| Tardiness       | 0,88484  | 0,92479 | 0,98746 | 1,1967 | 1,4592 | 2,1728 | 4,8361 |

|              | Cartões  |         |        |        |        |        |        |
|--------------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 24      | 20     | 16     | 14     | 12     | 10     |
| TT           | 13,852   | 13,472  | 13,142 | 12,917 | 12,1   | 11,376 | 10,36  |
| TTT          | 13,852   | 13,915  | 14,065 | 14,71  | 15,379 | 16,938 | 21,505 |
| %Atraso      | 13,412   | 13,364  | 13,896 | 16,129 | 18,308 | 23,407 | 36,617 |
| Tardiness    | 1,0105   | 0,98648 | 1,0373 | 1,3466 | 1,6324 | 2,4027 | 5,1893 |

## Modelo Divergente de 3 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Horas

|                 | <b>Cartões</b> |         |         |         |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 24      | 20      | 16      | 14      | 12      | 10      |
| TT              | 12,668         | 12,477  | 12,317  | 11,996  | 11,73   | 11,345  | 10,757  |
| TTT             | 12,668         | 12,482  | 12,334  | 12,051  | 11,836  | 11,553  | 11,204  |
| %Atraso         | 11,709         | 11,582  | 10,674  | 7,4379  | 5,4745  | 3,8351  | 2,9117  |
| Tardiness       | 0,88484        | 0,70158 | 0,57016 | 0,44427 | 0,42223 | 0,45942 | 0,57601 |

|              | <b>Cartões</b> |         |        |         |         |         |         |
|--------------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 24      | 20     | 16      | 14      | 12      | 10      |
| TT           | 13,852         | 13,661  | 13,495 | 13,159  | 12,877  | 12,451  | 11,786  |
| TTT          | 13,852         | 13,668  | 13,516 | 13,229  | 13,009  | 12,711  | 12,352  |
| %Atraso      | 13,412         | 13,341  | 12,706 | 9,3949  | 6,9671  | 4,7754  | 3,4568  |
| Tardiness    | 1,0105         | 0,82695 | 0,6868 | 0,51987 | 0,47673 | 0,49565 | 0,61711 |

## Modelo Divergente de 5 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Unidades

|                 | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 24     | 20     | 18     | 16     | 15     | 14     |
| TT              | 11,717   | 11,602 | 11,552 | 11,54  | 11,557 | 11,573 | 11,6   |
| TTT             | 30,266   | 30,227 | 30,398 | 30,728 | 31,641 | 32,658 | 34,814 |
| %Atraso         | 29,139   | 28,867 | 29,618 | 31,077 | 34,961 | 38,871 | 45,567 |
| Tardiness       | 1,9732   | 1,969  | 2,0946 | 2,3215 | 2,9578 | 3,7022 | 5,4065 |

|              | Cartões  |         |         |         |         |         |        |
|--------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 24      | 20      | 18      | 16      | 15      | 14     |
| TT           | 11,722   | 11,609  | 11,56   | 11,549  | 11,561  | 11,58   | 11,596 |
| TTT          | 11,722   | 11,685  | 11,865  | 12,2    | 13,115  | 14,131  | 16,235 |
| %Atraso      | 2,2589   | 2,286   | 2,5508  | 3,029   | 4,4198  | 6,1431  | 10,025 |
| Tardiness    | 0,14912  | 0,15486 | 0,18644 | 0,24065 | 0,39459 | 0,60469 | 1,2441 |

## Modelo Divergente de 5 estágios $CV^2=0,5$ Quantum em Horas

|           | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|-----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RF-POLCA  | Infinito | 24     | 20     | 18     | 16     | 15     | 14     |
| TT        | 11,717   | 11,633 | 11,596 | 11,581 | 11,602 | 11,647 | 11,714 |
| TTT       | 30,266   | 30,208 | 30,27  | 30,415 | 30,868 | 31,432 | 32,477 |
| %Atraso   | 29,139   | 28,765 | 28,829 | 29,213 | 30,576 | 32,219 | 35,036 |
| Tardiness | 1,9732   | 1,9499 | 2,016  | 2,1377 | 2,4988 | 2,9448 | 3,7881 |

|           | Cartões  |         |         |         |         |         |        |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| POLCA     | Infinito | 24      | 20      | 18      | 16      | 15      | 14     |
| TT        | 11,722   | 11,641  | 11,6    | 11,588  | 11,605  | 11,648  | 11,725 |
| TTT       | 11,722   | 11,668  | 11,721  | 11,88   | 12,312  | 12,839  | 13,99  |
| %Atraso   | 2,2589   | 2,1555  | 2,2692  | 2,5812  | 3,3267  | 4,1862  | 6,0054 |
| Tardiness | 0,14912  | 0,16346 | 0,20771 | 0,27741 | 0,43185 | 0,62532 | 1,1056 |

## Modelo Divergente de 5 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Unidades

|                 | Cartões  |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito | 28     | 24     | 22     | 20     | 18     | 17     |
| TT              | 14,539   | 14,468 | 14,476 | 14,51  | 14,582 | 14,702 | 14,741 |
| TTT             | 33,088   | 33,197 | 33,573 | 34,077 | 35,183 | 38,254 | 41,953 |
| %Atraso         | 42,669   | 42,846 | 44,06  | 45,713 | 49,303 | 57,249 | 64,399 |
| Tardiness       | 3,6513   | 3,7564 | 4,062  | 4,4647 | 5,3569 | 7,9613 | 11,261 |

|              | Cartões  |         |         |         |        |        |        |
|--------------|----------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito | 28      | 24      | 22      | 20     | 18     | 17     |
| TT           | 14,547   | 14,482  | 14,489  | 14,529  | 14,598 | 14,7   | 14,747 |
| TTT          | 14,547   | 14,663  | 15,051  | 15,567  | 16,723 | 19,723 | 23,434 |
| %Atraso      | 5,392    | 5,6655  | 6,3672  | 7,3197  | 9,5126 | 15,616 | 23,141 |
| Tardiness    | 0,44168  | 0,49679 | 0,61349 | 0,76031 | 1,0968 | 2,1971 | 3,9643 |

## Modelo Divergente de 5 estágios $CV^2=0,707$ Quantum em Horas

|                 | <b>Cartões</b> |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>RF-POLCA</b> | Infinito       | 28     | 24     | 22     | 20     | 18     | 17     |
| TT              | 14,539         | 14,469 | 14,456 | 14,457 | 14,504 | 14,602 | 14,711 |
| TTT             | 33,088         | 33,044 | 33,157 | 33,26  | 33,632 | 34,597 | 35,618 |
| %Atraso         | 42,669         | 42,385 | 42,471 | 42,724 | 43,467 | 45,384 | 47,397 |
| Tardiness       | 3,6513         | 3,6265 | 3,7368 | 3,8266 | 4,1559 | 5,0044 | 5,9038 |

|              | <b>Cartões</b> |         |         |         |        |        |        |
|--------------|----------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| <b>POLCA</b> | Infinito       | 28      | 24      | 22      | 20     | 18     | 17     |
| TT           | 14,547         | 14,481  | 14,474  | 14,483  | 14,526 | 14,615 | 14,722 |
| TTT          | 14,547         | 14,512  | 14,627  | 14,798  | 15,155 | 15,97  | 17,05  |
| %Atraso      | 5,392          | 5,2794  | 5,3812  | 5,5745  | 6,1423 | 7,5395 | 9,1551 |
| Tardiness    | 0,44168        | 0,45708 | 0,54396 | 0,65147 | 0,8334 | 1,217  | 1,8102 |