



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Bruno Filipe Teixeira Azevedo

**SIMULAÇÃO DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE
TRANSPORTE INTERNO DE MATERIAIS: ESTUDO
DE CASO NA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão
Industrial orientada pelo Professor Doutor Samuel de Oliveira Moniz e
apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências
e Tecnologias da Universidade de Coimbra.**

julho de 2022



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação de sistemas automatizados de transporte interno de materiais: estudo de caso na indústria de semicondutores

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

Simulation of automated internal material transport systems: a case study from the semiconductor industry

Autor

Bruno Filipe Teixeira Azevedo

Orientador

Professor Doutor Samuel Moniz

Júri

Presidente	Professor Doutor Cristóvão Silva Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Miguel Vieira Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Samuel Moniz Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, julho, 2022

*“Education makes a people easy to lead, but difficult to drive, easy to govern,
but impossible to enslave.”*

Henry Peter Brougham

Aos meus pais e irmã

Agradecimentos

Este documento marca o final de uma etapa iniciada há 5 anos atrás quase que por acidente. Pelo caminho deixo desafios, tristezas, incertezas, alegrias e muitas histórias para contar. Trilhar este caminho só foi possível graças ao apoio, à energia e à força de várias pessoas e instituições às quais deixo aqui o meu mais sincero e profundo agradecimento.

Como não podia deixar de ser, o meu maior agradecimento vai para os meus pais e irmã. Quando o futuro parecia incerto, foram eles que me incentivaram a partir nesta jornada, e independentemente de todas as dificuldades atravessadas, sempre fizeram os possíveis e os impossíveis para que nunca me faltasse nada. Devo a eles a pessoa que sou hoje e espero estar à altura para retribuir todo o vosso esforço e sacrifício, que nunca serão esquecidos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Samuel Moniz, um muito obrigado por todo o apoio prestado durante a realização deste documento, assim como pelos projetos nos quais me envolvi graças à sua motivação e orientação.

Queria também agradecer à empresa que tive o prazer de estagiar pela oportunidade e pela forma como fui acolhido e recebido, em especial, ao meu orientar Eng. Jorge Ferreira, à Teresa Silva e ao Américo Roque.

E por fim, aos amigos que Coimbra me deu, em especial, ao Tiago e ao “Salix babylonica”, por todo o apoio e aventuras que passamos juntos durante este percurso.

A todos, o meu muito obrigado!

Resumo

Os rápidos desenvolvimentos e avanços tecnológicos na indústria de fabricação de semicondutores elevam a importância da utilização ideal dos recursos. Relatórios indicam que o custo de manuseamento dos materiais representa entre 20-50% do custo total de manufatura, razão pela qual as novas fábricas de *wafers* de 300mm dão tanta ênfase ao aumento do rendimento e à redução dos tempos de ciclo, objetivos atingidos através de um desenho correto dos sistemas de transporte interno de materiais. Devido ao peso e ao tamanho dos lotes de *wafers* de 300mm, os sistemas automáticos de transporte de produtos são ferramentas cruciais para atingir tais objetivos.

Neste projeto, desenvolvido numa fábrica de semicondutores, foi construído um modelo de simulação de eventos discretos para analisar o comportamento atual do transporte de produtos entre 3 grandes áreas produtivas para os primeiros 3 meses do ano, assim como para as metas produtivas das próximas 34 semanas. Esta análise demonstrou que o método atual de transporte, que segue uma lógica *mizusumashi*, é bastante ineficiente e não vai conseguir dar resposta ao aumento da procura previsto no futuro próximo. Desta forma, foram estudados 3 métodos de transporte alternativos, método de revisão periódica com intervalos fixos, método de revisão contínua e método de táxi. Os principais resultados sugerem que o método mais indicado para o sistema atual e para a procura futura é o método de táxi, obtendo reduções significativas no tempo de ciclo dos lotes assim como no número médio de lotes em espera para serem transportados. Adicionalmente, foi criada uma aplicação em Streamlit que, para qualquer nível de procura, sugere o melhor método a ser adotado, servindo também de base para o estudo futuro da automatização total dos transportes inter-área da fábrica.

Palavras-chave: Indústria de semicondutores, Sistemas de manuseamento de materiais, *Mizusumashi*, Simulação.

Abstract

The fast-paced developments and technological advances in the semiconductor manufacturing industry raise the importance of optimal resource utilization. Reports indicate that material handling systems represents between 20-50% of total manufacturing cost, which is why the newer 300-mm wafers fabs put so much emphasis on increasing yield and reducing cycle times, objectives achieved through correct design of internal transport systems. Given the weight and size of wafer lots, automated material handling systems are crucial tools to achieve these goals.

In this project, developed at a semiconductor factory, a discrete-event simulation was built to analyse the current behaviour of product transportation between 3 large productive areas for the first 3 months of the year, as well as for the production targets for the next 34 weeks. This analysis showed that the current transportation method, which follows a mizusumashi logic, is quite inefficient and will not be able to meet the expected increase in demand in the near future. This way, 3 alternative transport methods were studied, periodic reviewing method, ceaseless reviewing method and taxi method. The main results suggest that the most suitable method for the current system and for future demand is the taxi method, achieving significant reductions in wafer lots cycle time as well as in the average number of wafer lots waiting to be transported. Additionally, an application was created in Streamlit that, for any level of demand, suggests the best method to be adopted, also serving as a basis for studying the total automation of the factory's interbay transport in the future.

Keywords Semiconductor industry, Material handling systems, *Mizusumashi*, Simulation.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Siglas	xv
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Estrutura	2
2. Enquadramento teórico	3
2.1. Toyota production system	3
2.2. Lean manufacturing	5
2.2.1. Princípios lean	5
2.2.2. Desperdícios	6
2.3. Logística interna	7
2.3.1. Sistemas de manuseamento de materiais	8
2.3.2. Supermercado	11
2.4. Indústria de semicondutores	12
2.4.1. Simulação na indústria de semicondutores	13
3. Caso de estudo	17
3.1. Situação atual	17
3.1.1. Mizusumashi manual	17
3.1.2. Mizusumashi automático	22
3.2. Descrição do problema	24
4. Metodologia proposta	29
4.1. Análise geral	30
4.2. Métodos de transporte em análise	30
4.3. Conceitualização do modelo de simulação	34
4.3.1. Nível de detalhe da simulação	34
4.3.2. Entidades do modelo de simulação	34
4.3.3. Inputs do modelo de simulação	35
4.4. Desenvolvimento do modelo de simulação	36
4.4.1. SimPy overview	36
4.4.2. Estrutura do modelo de simulação	36
4.5. Verificação e validação do modelo de simulação	38
4.6. Desenvolvimento da aplicação em Streamlit	41
4.6.1. Streamlit overview	41
4.6.2. Aplicação em Streamlit	41
5. Análise de resultados	43
5.1. Resultados para a produção dos primeiros 3 meses do ano	43
5.2. Resultados para as metas das próximas 34 semanas	46
5.2.1. Obtenção dos dados	46

5.3. Análise e discussão de resultados	51
5.4. Desenho fatorial $2k$	52
5.4.1. Análise dos resultados	54
5.5. Avaliação do desempenho dos métodos de transporte com diferentes níveis de procura.....	55
6. Conclusões e trabalhos futuros.....	57
Referências bibliográficas	59
Anexo A	63
Anexo B.....	65
Anexo C.....	67
Anexo D	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Fluxo de trabalho de um <i>mizusumashi</i> (Nomura & Takakuwa, 2006)	11
Figura 2.2. Rota de um <i>mizusumashi</i> (Nomura & Takakuwa, 2006)	11
Figura 2.3. 4 níveis de simulação na indústria de semicondutores (Fowler et al., 2015)....	15
Figura 3.1. <i>Layout</i> do chão de fábrica	18
Figura 3.2. Rota e entrepostos do <i>mizusumashi</i> manual.....	18
Figura 3.3. Horário do <i>mizusumashi</i> manual.....	19
Figura 3.4. Cartão identificativo.....	19
Figura 3.5. FOUP	20
Figura 3.6. Estante	20
Figura 3.7. Entrepostos 1 para 1	21
Figura 3.8. Entrepostos 1 para n	21
Figura 3.9. Entrepostos n para 1	21
Figura 3.10. Entrepostos, posto de carregamento e rotas do <i>mizusumashi</i> automático.....	22
Figura 3.11. Horário do <i>mizusumashi</i> automático	23
Figura 3.12. Propriedades do AGV MiR200	23
Figura 3.13. Tempos de movimentação isolados entre áreas e tempo total de cada rota	23
Figura 3.14. Número de lotes por rota nos primeiros 3 meses do ano	26
Figura 4.1. Metodologia proposta.....	29
Figura 4.2. Horário do <i>mizusumashi</i> automático	31
Figura 4.3. Rotas do <i>mizusumashi</i> automático	31
Figura 4.4. Rotas do método de revisão contínua	32
Figura 4.5. Diagrama de estados para o método de táxi.....	33
Figura 4.6. Características do AGV	38
Figura 4.7. Características do AGV	38
Figura 4.8. Mapa de simulações	39
Figura 4.9. Interface da aplicação em Streamlit	42
Figura 4.10. Interface da aplicação em Streamlit	42
Figura 5.1. Histograma dos tempos de transporte para a situação atual para a procura passada.....	44

Figura 5.2. Histograma dos tempos de transporte para a método de revisão periódica para a procura passada	44
Figura 5.3. Histograma dos tempos de transporte para a método de revisão contínua para a procura passada	45
Figura 5.4. Histograma dos tempos de transporte para a método de táxi para a procura passada	45
Figura 5.5. Taxa de utilização dos veículos para a procura passada	46
Figura 5.6. Histograma dos lotes diários da produção dos primeiros 3 meses do ano.....	47
Figura 5.7. Teste de normalidade para a distribuição diária de FOUPs nos primeiros 3 meses do ano	48
Figura 5.8. Distribuição das FOUPs ao longo do dia.....	48
Figura 5.9. Histograma dos tempos de transporte para a situação atual para a procura futura	49
Figura 5.10. Histograma dos tempos de transporte para a método de revisão periódica para a procura futura	49
Figura 5.11. Histograma dos tempos de transporte para a método de revisão contínua para a procura futura	50
Figura 5.12. Histograma dos tempos de transporte para a método de táxi	50
Figura 5.13. Taxa de utilização dos veículos para a procura futura.....	51
Figura 5.14. Variação do tempo de transporte em função da procura	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Resumo dos métodos de transporte em estudo	33
Tabela 4.2. Matriz dos tempos de deslocamento entre áreas.....	35
Tabela 4.3. Matriz dos tempos de deslocamento estimados.....	40
Tabela 4.4. Matriz dos tempos de deslocamento cronometrados	40
Tabela 4.5. Matriz da diferença absoluta entre os tempos estimados e os tempos medidos.....	40
Tabela 5.1. Variação do WIP para os 4 métodos de transporte com a procura passada	46
Tabela 5.2. Variação do WIP para os 4 métodos de transporte com a procura futura	51
Tabela 5.3. Fatores e respetivos níveis do desenho fatorial 23	53
Tabela 5.4. Desenho fatorial 23 para o método de táxi	53
Tabela 5.5. Efeitos da análise fatorial 2k	54

Siglas

WIP – *Work-in-progress*

FOUP – *Front opening unified pod*

MHS – *Material handling systems*

AMHS – *Automated material handling system*

TPS – *Toyota Production System*

JIT – *Just-in-time*

AGV – *Automated guided vehicle*

FIFO – *First in, first out*

FAB – *Semiconductor fabrication plant*

SED – *Simulação de eventos discretos*

CVS - *Concurrent Versions System*

OFAT – *One-factor-at-a-time*

1. INTRODUÇÃO

O sistema de fabricação de semicondutores é um dos sistemas de manufatura mais complexos, caracterizado por fluxos reentrantes, enorme complexidade de processo, elevados níveis de trabalho em processo (WIP), partilha de máquinas e prazos de entrega apertados. Estas características normalmente resultam na necessidade de manusear um elevado volume de lotes de *wafers*. Na manufatura de semicondutores, um lote é um recipiente padrão no qual são agrupadas uma certa quantidade de *wafers*, chamado de *Front opening unified pod* (FOUP). Esta quantidade pode ser de 12 ou de 25. Numa típica linha de produção de semicondutores de 300mm, cada lote passa repetidamente por processos como: deposição de filme, padronização de filme, gravação de filme, testes e processos de limpeza mais de 20 vezes, resultando num total de 600 operações (Zhang et al., 2015).

A maioria das fábricas atuais de semicondutores e aquelas que estão a ser projetadas para um futuro próximo usam uma configuração de *layout* celular. Nesta abordagem, a instalação é dividida em várias áreas que contêm equipamentos de processamento com funções semelhantes. Esta situação provoca uma grande quantidade de fluxo de material não só dentro das áreas (intra-área), mas também entre áreas (inter-área) (James & Yang., 1997). Uma *wafer* de 300mm percorre aproximadamente 13-16km durante o seu processamento e visita 250 ferramentas de processo para realizar as centenas de etapas individuais de processamento. Isto faz com que os sistemas de manuseamento de materiais (MHS) nas fábricas de semicondutores sejam uma das atividades mais críticas e determinantes para o seu sucesso (Agrawal & Heragu., 2006). Relatórios indicam que o custo de manuseamento do material representa entre 20-50% do custo total de manufatura, pelo que o correto desenho dos MHS é, sem dúvida, uma prioridade nesta indústria (Wu et al., 2011).

A elevada distância percorrida pelas FOUPs aliada ao facto de serem relativamente pesadas, aproximadamente 12kg, torna inviável estas serem transportadas manualmente, principalmente no transporte entre áreas. Consequentemente, os sistemas de transporte de materiais automatizado (AMHS) é amplamente adotado. Este sistema melhora

significativamente a eficácia do transporte assim como ajuda a reduzir o WIP (Zhang et al., 2016).

Desta forma, este projeto é motivado pela necessidade de avaliar e otimizar o modelo de transporte inter-área que está, atualmente, a ser posto em prática pela empresa, num contexto industrial onde é crítico que haja o mínimo desperdício possível no transporte interno de materiais.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo descrever e desenvolver um modelo de simulação capaz de avaliar o desempenho do sistema atual de transportes inter-área da empresa para diferentes níveis de procura, entre 3 grandes áreas produtivas. Com base nos resultados obtidos a partir do modelo desenvolvido, avaliar outros métodos de transporte em busca da alternativa mais eficiente, que reduza ao máximo o tempo de ciclo dos produtos e o respetivo WIP.

Além do objetivo descrito acima, desenvolver uma aplicação em Streamlit que esteja preparada para incluir novas rotas, permitindo o estudo futuro do impacto da automatização de todos os transportes inter-área da empresa.

1.2. Estrutura

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo é feita uma pequena introdução ao tema e à motivação deste trabalho, assim como os seus principais objetivos. No segundo capítulo é feito o enquadramento teórico do tema em estudo, começando pelo conceito mais abrangente dos MHS e, posteriormente, especificando os principais métodos de transporte e elementos de logística interna. No terceiro capítulo é descrito o problema que motivou este trabalho e é feita a apresentação da empresa onde foi realizado. No quarto capítulo, é descrita a metodologia que foi seguida para resolver o problema e no quinto capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos. Finalmente, no sexto capítulo, são expostas as principais conclusões deste trabalho e propostas para trabalho futuro.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Este segundo capítulo consiste em estabelecer uma base bibliográfica para suportar a resolução do problema em questão. Deste modo, o conhecimento teórico necessário para compreender o trabalho desta dissertação é aqui exposto, abordando temas que serviram de base para o desenvolvimento deste caso de estudo.

Primeiramente é explicada a importância da logística interna, mais concretamente, dos sistemas de transporte interno de materiais, transporte esse que representa uma das 7 fontes primárias de desperdício identificadas por Taiichi Ohno. Em seguida, é introduzido o conceito de *mizusumashi* e todas as suas variantes, assim como o conceito de supermercado, adjacente ao método *mizusumashi*. Seguidamente, são expostas as principais características da indústria dos semicondutores e, finalmente, a aplicabilidade do método de simulação de eventos discretos para analisar problemas desta indústria.

2.1. Toyota production system

Toyota Production System (TPS) é uma estratégia que ajuda a organizar a fabricação e a logística de um negócio. A abordagem inovadora para implementar uma filosofia de produção *lean* no chão de fábrica das empresas industriais revolucionou por completo a perspectiva de fabricação (Thun et al., 2010).

O TPS foi desenvolvido e evoluído por necessidade. No período pós segunda guerra mundial, a proporção entre a força de trabalho japonesa e americana na indústria automóvel era de cerca de 1 para 10. Mas podia um trabalhador americano exercer dez vezes mais esforço físico do que um trabalhador japonês? Certamente que não, os japoneses estavam a desperdiçar alguma coisa. Se fosse possível eliminar o desperdício, a produtividade podia aumentar até um fator de 10. Foi esta ideia que marcou o início do TPS atual.

No entanto, foi apenas no período após a crise do óleo em 1973, que a indústria reconheceu a importância do TPS. A economia do Japão entrou em colapso, as empresas não tinham qualquer perspectiva de crescimento e sofreram danos económicos pesados, no entanto, a Toyota Motor Company em 1975, 1976 e 1977 lucrou mais do que outras

empresas japonesas. A diferença cada vez maior com as restantes empresas fez com que a pessoas se perguntassem o que é que se passava no interior da Toyota.

Quando a economia de crescimento rápido parou, ficou claro que um negócio não podia ser lucrativo se utilizasse o sistema convencional americano de produção em massa, que resultou tão bem durante tanto tempo. Certas restrições no mercado exigiam a produção de pequenas quantidades de produtos com muita variabilidade, sob condições de baixa procura, um destino que a indústria automóvel japonesa enfrentou no período pós-guerra. Estas restrições serviram para testar se os fornecedores automóveis japoneses conseguiam estabilizar-se no mercado e sobreviver à competição com os sistemas de produção e vendas em massa, sistemas estes que já estavam bem implementados na Europa e nos Estados Unidos (Ohno & Bodeck., 2019).

A primeira publicação em inglês acerca do TPS, sob autoria de Sugimori e os seus coautores em 1977, descreve dois conceitos chave: *just-in-time* (JIT) e *jidoka*, ou *built-in quality*, ou autonomação. Fujio Cho, um dos autores da primeira publicação em inglês sobre o TPS, descreveu este sistema como uma casa construída sobre uma base de processos estáveis e padronizados, com os elementos-chave do TPS, JIT e *jidoka*, a servir de pilares e tudo a suportar o telhado que representa os resultados ideais: elevada qualidade, custo baixo e *lead time* reduzido para o cliente.

Assim como Sugimori et al, as publicações posteriores dos gestores de topo da Toyota, Taiichi Ohno (1988, 1982) e Shingo and Dillon (1989), ambas enfatizam os mesmo dois elementos-chave: JIT e *jidoka*. As publicações destes autores já foram mais bem recebidas pelos gestores americanos, quando comparado à primeira publicação sobre o assunto. (Loys et al., 2020)

JIT significa que, no fluxo de produção, as peças necessárias à linha de montagem chegam à linha no preciso momento em que são precisas e na exata quantidade necessária. Uma empresa que consiga estabelecer corretamente este fluxo consegue aproximar-se de um estado de inventário zero (Ohno & Bodeck., 2019). No seu estudo, Y. Sugimori e os seus coautores (1977) estabeleceram ainda quatro requisitos para uma implementação JIT. O primeiro requisito é que a retirada de materiais tem de ser feita pelos processos subsequentes. A Toyota materializou este requisito adotando uma estratégia inversa à que “o processo anterior fornece as peças ao processo seguinte”. O segundo requisito é que a produção seja capaz de atingir o *one piece flow*. Ou seja, cada processo

pode produzir apenas uma peça, pode transportar apenas uma peça de cada vez, e, além disso, tem apenas uma peça em *stock* entre o equipamento e o processo. O terceiro requisito é o nivelamento da produção. Por fim, o quarto requisito é a eliminação de desperdício resultante da sobreprodução. O conceito subjacente aos sistemas de produção JIT é que a existência de inventário é repudiada.

O outro pilar do TPS é chamado de automação, também conhecido como automação com um toque humano. Muitas máquinas operam sozinhas quando são ligadas. No entanto, as máquinas têm capacidades de produção tão elevadas que uma pequena anormalidade, por exemplo, um pedaço de lixo que caia na máquina, pode danificá-la de alguma forma e provocar centenas ou milhares de peças defeituosas. Não existe um mecanismo de verificação automática para tais contratempos, razão pela qual o TPS tem como pilar a automação capaz de evitar estes danos, ou seja, automação (Ohno & Bodeck., 2019).

2.2. Lean manufacturing

Lean manufacturing, um conceito introduzido por Womack e Jones em 1990, explora os vários conceitos utilizados no TPS e dá ênfase especial a: eliminação dos vários tipos de desperdício que ocorrem em toda a cadeia de valor, motivação e envolvimento dos trabalhadores, otimização dos equipamentos, redução de custos e o aumento da satisfação do consumidor final.

2.2.1. Princípios lean

De acordo com Womack e Jones, *lean thinking* pode ser definido por um processo com 5 fases. Primeiro, há a necessidade de especificar o valor. O valor deve ser definido pelo cliente em termos de produtos específicos com capacidades específicas e a preços específicos. Segundo, deve ser identificada a cadeia de valor. A cadeia de valor incorpora todas as ações necessárias para trazer o produto ao cliente, incluindo o desenho detalhado, engenharia, produção, pedidos, planeamento da produção e entrega. Esta fase deve identificar as atividades que acrescentam valor, as que não acrescentam valor mas são indispensáveis e as que não acrescentam valor e são dispensáveis. As últimas devem ser eliminadas. A terceira fase consiste na criação de fluxo. Os autores argumentam que é necessária uma mudança radical dos processos em lote, e esperam que tamanha alteração

reduza o tempo de desenvolvimento de produto para metade, o tempo de processamento de pedidos em 75% e o tempo físico de produção em 90%. A quarta fase é a criação de um sistema *pull*, ou seja, deixar que o cliente “ordene” que se produza assim que precise. Por fim, a quinta fase é a procura da perfeição.

2.2.2. Desperdícios

A identificação sistemática e a eliminação de desperdício é um dos princípios do *lean manufacturing*, com o intuito de criar e entregar valor de uma forma mais eficiente ao consumidor. De acordo com os princípios do TPS, os 3 MUs – *Muda* (desperdício) junto com *Mura* (desnívelamento) e *Muri* (sobrecarga) – representam os 3 maiores inimigos da eficiência da produção *lean* (Romero et al., n.d.)

Muda pode ser definido como tudo aquilo que é descartável e não acrescenta valor. A sua existência acrescenta custos desnecessários, problemas de qualidade, *lead time* nos processos de negócio e é algo pelo qual o cliente não está disposto a pagar. Como mencionado no parágrafo anterior, o foco deve estar na eliminação de desperdício e otimização de processos, tudo o que não contribuir para esse objetivo representa *Muda*, e deve por isso ser eliminado (Sutherland., 2007), (Rene & Domingo., n.d.).

A procura constante da eliminação de desperdício é tão importante atualmente como era quando Taiichi Ohno identificou as fontes primárias de desperdício, às quais chamou de “*The seven deadly wastes*”. Estes são:

- **Sobreprodução** – A entrega de produtos antes de serem necessários é chamado de sobreprodução. Para a cadeia de abastecimento isto é agravado por causa da chamada “*created demand*”. A procura criada é causada pelo pedido de uma quantidade superior à necessária.
- **Atrasos/espera** – Todo o tempo de espera entre o fim de uma atividade e o início da seguinte. Um exemplo inclui o intervalo entre a chegada de um camião e o seu carregamento.
- **Transporte** – Transporte desnecessário que resulta em custos adicionais. Exemplos passam por paragens fora de rota e a alocação de inventário com alta rotatividade no final do armazém.

- **Deslocação** – Movimentação desnecessária de pessoas, tal como caminhar, alcançar e esticar. Alguns exemplos são deslocações desnecessárias devido a uma má organização ou um design pouco ergonómico.
- **Inventário** – Toda a atividade logística que resulte em inventário a mais do que aquilo que é preciso ou numa localização onde não é preciso. Entregas antecipadas, receita ou pedido de quantidade superior à necessária são exemplos deste desperdício.
- **Espaço** – Utilização não otimizada do espaço. Por exemplo, uma trailer que não utilize a capacidade total, recipientes meio vazios, uso ineficiente do espaço de armazém e até cargas excessivas.
- **Erros** – Tudo aquilo que provoque retrabalho, ajustes desnecessários ou devoluções, isto é, erros de faturação, discrepâncias e ajustes de stock e produtos danificados/defeituosos/errados/mal etiquetados.

2.3. Logística interna

O foco na eliminação de desperdício levou as empresas a procurar estratégias para melhorar o fluxo de informação e materiais ao longo da empresa. Uma boa gestão da logística interna permite eliminar atividades que não agregam valor na perspetiva do cliente, reduzir custos e aumentar o nível de serviço.

Existem três classificações para as atividades produtivas, são elas atividades de valor acrescentado, atividades causais e desperdícios. As atividades de valor acrescentado são atividades que agregam valor ao produto final, pelo que são indispensáveis. As atividades causais são atividades que não agregam valor ao produto mas são impossíveis de remover do processo produtivo. Os desperdícios, por sua vez, são atividades que não agregam valor ao produto nem são indispensáveis ao processo produtivo, pelo que podem e devem ser eliminados.

O foco das empresas na eliminação de desperdícios levou a que estas criassem estratégias que melhorassem o fluxo interno de informação e de materiais. Noutras palavras, uma boa gestão da logística interna permite que sejam eliminadas as atividades descartáveis, o que leva a uma redução de custos e um aumento do nível de serviço (Sugimori et al., 1977). Surge assim a necessidade de estudar os MHS e os restantes aspetos da logística interna.

2.3.1. Sistemas de manuseamento de materiais

Sistemas de manuseamento de materiais, geralmente conhecidos como *material handling systems* (MHS), são equipamentos mecânicos usados para a movimentação, armazenamento, controlo e proteção de materiais, mercadorias e produtos durante o processo de fabricação, distribuição e consumo (Johnson & Brandeau., 1999). Os MHS desempenham um papel vital em ambientes de manufatura visto que fornecem os meios pelos quais materiais e ferramentas são transportados entre centros de trabalho e áreas de armazenamento (Manda & Palekar., 1997). A escolha dos MHS mais adequados e a sua correta utilização é essencial para a eliminação dos desperdícios de transporte, que são considerados por Taiichi Ohno um dos “*seven deadly wastes*”.

A tecnologia dos MHS está a tornar-se cada vez mais importante para todos os tipos de operações de negócios no ambiente competitivo em que vivemos hoje em dia. Essa tecnologia pode mudar a forma como uma empresa compete no mercado e a identificação precoce de oportunidades vai tornar-se cada vez mais importante para a sobrevivência no futuro (Vijayaram, T.R., 2006). Ao projetar uma nova instalação, como uma fábrica ou um armazém, uma parte integrante é a seleção adequada dos MHS. Apesar do grande número de alternativas, como sistemas automatizados de transporte de materiais através de transportadores ou veículos automáticos, a maioria das instalações usa veículos acionados por pessoas (sistema de manuseamento discreto de materiais não automatizado), geralmente empilhadores. Para projetar adequadamente tais sistemas, é preciso determinar o número necessário de veículos (Dukić, G et al., 2018).

Os MHS são aplicados tanto para operações de fabricação como de distribuição. Não acrescentam valor ao produto, no entanto, representam um elemento significativo de custo (Vijayaram, T.R., 2006). O custo associado aos MHS corresponde entre 20% a 50% do custo total de um produto, e o manuseamento eficiente de materiais pode reduzir o custo das operações do sistema de manufatura entre 15% a 30%. Esses números ressaltam a importância dos custos associados ao manuseamento de materiais como elemento de melhoria da estrutura de custos de um produto (Sujono & Lashkari., 2007). No entanto, a redução do custo do produto e das operações não é o único benefício resultante de uma boa gestão dos MHS. Para além da redução dos custos, uma boa implementação e gestão dos

MHS promove a segurança, melhora as condições de trabalho, promove a produtividade, aumenta o uso das instalações, reduz o peso e controla o *stock* (Vijayaram, T.R., 2006).

Como qualquer outro sistema, são necessárias medidas de performance para avaliar os MHS. Uma revisão da literatura feita por Beamon descreve as seguintes medidas de desempenho: tempo de viagem dos veículos; proporções de viagem dos veículos; tempo de resposta dos veículos; tempo de manuseamento por tarefa; taxa de utilização dos veículos; número de cargas completadas; tempos médios de espera de carga; tempos médios de espera; custo do sistema; flexibilidade do sistema e congestionamento. O congestionamento geralmente surge quando a procura pelo transporte ultrapassa a sua capacidade ou um componente do MHS (por exemplo, um veículo) interrompe e bloqueia o tráfico em determinado segmento da rede (Beamon, B.M., 1999).

2.3.1.1. Mizusumashi

O termo *mizusumashi* é um termo utilizado por artigos recentes para designar o operador que põe em prática o sistema *milk-run*. (Gil et al., 2020) Quando se tem em consideração o ambiente em que o sistema é aplicado, o *milk-run* pode ser dividido em *milk-run* interno e *milk-run* externo. Neste documento, o termo *mizusumashi* será utilizado com o significado de *milk-run* interno. Nos sistemas de manufatura modernos, o *mizusumashi* representa um sistema cíclico baseado em rotas fixas. Este sistema é um dos meios mais populares de aplicar a filosofia JIT no transporte interno de materiais (Chan et al., 2017). Este sistema permite entregas frequentes de peças em lotes pequenos de um armazém central para vários pontos de utilização no chão de fábrica. Por norma, estas entregas ocorrem em intervalos de tempo constantes e pré-determinados (Klenk & Galka., 2019).

O *mizusumashi* assenta na ideia de que apenas o material consumido deve ser repostado. O tamanho de lote é determinado e posteriormente controlado através de *kanbans*. O tempo de ciclo e a definição das rotas são definidos previamente. Os sistemas *mizusumashi* começaram por ser utilizados pela indústria automóvel onde um comboio logístico, ou um carrinho manual, transportavam peças do supermercado para as linhas de produção através de uma rota e de um horário pré-definidos. Consequentemente, várias estações eram abastecidas pelo mesmo comboio na mesma rota e durante o mesmo período (Gotthardt et al., 2019).

Os métodos de transporte de materiais podem ser divididos em duas categorias: manuais e automáticos. O primeiro é um sistema em que os trabalhadores fornecem as peças

com as suas mãos ou com o auxílio de carrinhos de transporte, como é o caso do *mizusumashi*. O último é um sistema que adota equipamentos de transporte de materiais mais técnicos como veículos guiados automáticos (AGVs) e transportadores para transferir produtos entre processos e armazéns. No sistema automático, a reconfiguração do *layout* é um processo custoso. Portanto, o sistema de transporte manual é mais adequado para indústrias que alterem frequentemente o seu *product mix* ou o *layout* do chão de fábrica de acordo com a procura, devido ao facto deste sistema adaptar-se mais facilmente do que o sistema automático a este tipo de alterações industriais (Nomura & Takakuwa., 2006).

Nomura e Takakuwa (2006) dividem o *mizusumashi* em dois métodos distintos. Um método é chamado de método de revisão periódica e o outro de método de revisão contínua. No método de revisão periódica, um trabalhador verifica a quantidade de peças em WIP nas linhas de montagem num intervalo de tempo pré-definido, e repõe a quantidade de peças correspondente à capacidade das caixas que o trabalhador recolheu da última vez. Em seguida, o trabalhador dirige-se ao armazém para encher as caixas vazias recolhidas para fazer o próximo reabastecimento. Finalmente, aguarda numa área de espera pela próxima rota.

Relativamente ao método de revisão contínua, a reposição e verificação de peças necessárias ocorre em simultâneo. O trabalhador verifica a quantidade necessária para o próximo reabastecimento logo após completar o reabastecimento anterior. Utilizando este método, o trabalhador move-se constantemente pelo chão de fábrica já que não há tempos de espera entre rotas consecutivas, ao passo que no primeiro método o trabalhador tem períodos de espera entre a conclusão duma rota e o começo da próxima. (Nomura & Takakuwa., 2006)

Nomura e Takakuwa (2006) descrevem o fluxo de trabalho de um *mizusumashi* através do esquema representado na Figura 2.1. As caixas de texto a linha contínua são comuns a ambos os métodos de revisão, ao passo que a linha a tracejado é apenas relativa ao método de revisão periódica. Da mesma forma, a Figura 2.2 representa uma rota típica de um *mizusumashi* pelo chão de fábrica, em que a linha a tracejado é relativa apenas ao método de revisão periódica.

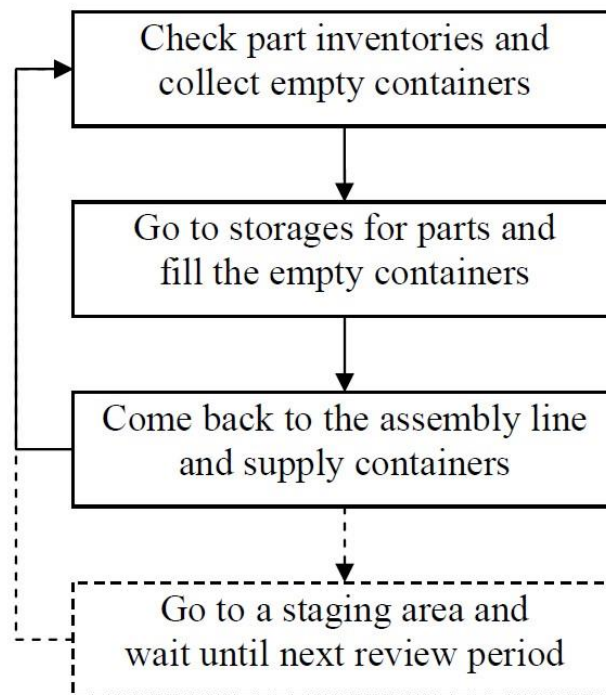


Figura 2.1. Fluxo de trabalho de um *mizusumashi* (Nomura & Takakuwa, 2006)

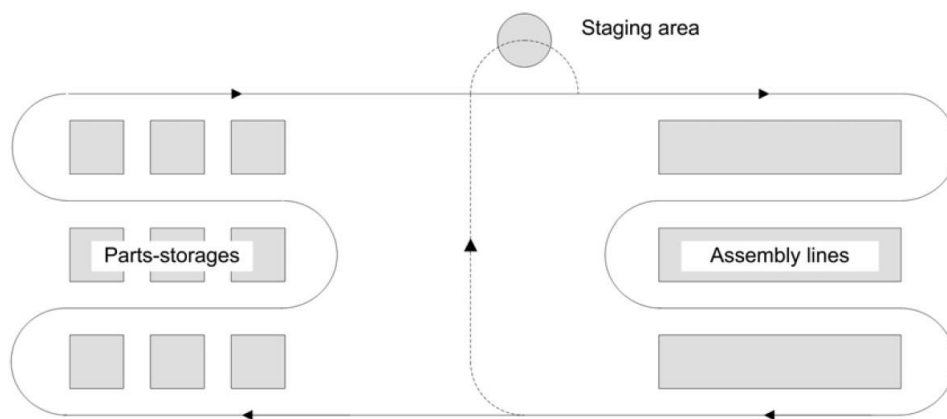


Figura 2.2. Rota de um *mizusumashi* (Nomura & Takakuwa, 2006)

2.3.2. Supermercado

O conceito de supermercado assemelha-se a uma loja que vai abastecer os processos a jusante com as quantidades necessárias no momento certo. Assim, o supermercado tem como função armazenar materiais ou produtos acabados em quantidades pré-determinadas para futuramente fornecer esses materiais ao bordo de linha ou os produtos acabados ao cliente (Harris et al., 2011).

O supermercado difere de uma lógica *first-in, first-out* (FIFO) no sentido em que o fluxo de material e o fluxo de informação estão divididos. Numa linha de montagem FIFO, a informação relativa a determinado material está automaticamente associada ao próprio material, já que esta lógica exige que as peças saiam na mesma sequência em que chegaram. Por outro lado, se um material for removido do supermercado, a informação dessa peça é mandada de volta ao início do *loop kanban* para ser feito a sua reposição. Esta informação é o *kanban*. Um supermercado consiste assim em múltiplas linhas FIFO paralelas, uma para cada tipo de material. À semelhança das linhas de montagem FIFO, o supermercado tem um limite superior de peças, embora geralmente este número seja definido pelo número de *kanbans* em circulação. Segundo Denis Wiese & Christoph Roser (2016), um supermercado pode ser definido como: “Um supermercado é um inventário onde as peças são armazenadas separadamente pelo tipo. As peças que sejam do mesmo tipo seguem uma lógica FIFO. Quando uma peça sai, as informações são enviadas de volta ao longo do fluxo de valor para que a peça seja reabastecida”. Através deste conceito, as peças são armazenadas num ponto descentralizado intermédio, o supermercado, e depois carregadas em pequenos veículos de transporte responsáveis pelas entregas de pequenos lotes de peças ao chão de fábrica (Roser & Nakano., 2015).

2.4. Indústria de semicondutores

A fabricação de semicondutores é um processo complexo que consiste em centenas de etapas químicas e fotoligráficas feitas através de um fluxo de produtos com reentrância (Na et al., 2016). À medida que a procura por estes produtos continua a aumentar, fábricas de manufatura de semicondutores (normalmente designadas por FAB) estão a ser construídas em todo o mundo, e é expectável que o seu número continue a crescer no futuro. A construção duma FAB requer vários bilhões de dólares de investimento inicial para o desenvolvimento de processos de microfabricação. Por esta razão, determinar o *layout* da FAB de forma eficaz, desenhar processos de fabricação e transporte internos eficientes e fornecer produtos a custos competitivos tornaram-se as capacidades principais das empresas de semicondutores para recuperarem o custo do investimento inicial. Em particular, sabe-se que o correto desenho do *layout* é uma decisão estratégica com impacto significativo na

eficiência da produção, podendo reduzir 10-30% do custo total operacional (Suh & Choi., 2021).

O Sistema de fabricação de semicondutores é um dos sistemas de fabricação mais complexos que existe, caracterizado por altos fluxos reentrantes, enorme complexidade de processos, elevados níveis de WIP, partilha de ferramentas de produção e prazos de entrega apertados. Estas características distintas normalmente resultam em grandes volumes de manuseamento das *wafers*. Uma *wafers* é uma peça de silício, ou outro qualquer material semicondutor, sob a forma de um disco muito fino que serve de substrato para a criação de circuitos eletrónicos integrados. Na fabricação de semicondutores, um lote de *wafers* é um recipiente padrão no qual uma certa quantidade de *wafers* é agrupada, por norma, 12 ou 25. Numa típica linha de produção de *wafers* de 300mm, cada lote passa repetidamente por processos como fotolitografia, gravura, deposição de filmes, difusão, implantes iónicos, testes e limpeza cerca de 20 vezes, resultando num total de 600 operações. Portanto, cada lote é transportado por cerca de 16km para completar todas as operações exigidas. Relatórios mostram que o custo de manuseamento de materiais nesta indústria representa entre 20-50% do custo total de manufatura, pelo que a escolha correta dos MHS torna-se criticamente importante.

A maioria das fábricas atuais de semicondutores e aquelas que estão a ser projetadas para um futuro próximo usam uma configuração de *layout* celular. Nesta abordagem, a instalação é dividida em várias áreas que contêm equipamentos de processamento com funções semelhantes. Esta situação provoca uma grande quantidade de fluxo de material não só dentro das áreas (intra-área), mas também entre áreas (inter-área) (Peters & Yang., 1997). Além disso, devido ao aumento dos pesos dos transportadores de *wafers*, cerca de 12kg cada FOUP, o transporte manual torna-se inviável, principalmente no transporte entre áreas. Consequentemente, o sistema automático de manuseamento de materiais é amplamente adotado e ajuda significativamente a melhorar a eficiência do transporte de lotes de *wafers* e a reduzir o WIP global (Zhang et al., 2016).

2.4.1. Simulação na indústria de semicondutores

A simulação de eventos discretos (SED) é um método bem estabelecido e bastante bem-sucedido em algumas empresas de semicondutores. Esta ferramenta é usada para fazer avaliações de desempenho e para auxiliar nas tomadas de decisão.

A simulação é uma técnica que é usada para imitar o comportamento de um sistema do mundo real. Para explicar o funcionamento desta ferramenta começa-se por introduzir a noção de sistema. Um sistema é dado como um conjunto de componentes. Esses componentes e as suas associações definem a estrutura do sistema, ao passo que as interações desses entre si determinam o comportamento do sistema. Apenas alguns aspetos de um determinado sistema têm interesse em grande parte das situações. Dessa forma, trabalha-se com modelos, representações apropriadas do sistema original. Criar um modelo é impulsionado por objetivos que devem ser alcançados. O nível de detalhe da modelagem é influenciada por esses objetivos.

Fowler e os seus coautores (2015) identificam 4 níveis de simulação que são usados na manufatura de semicondutores. Classificados do mais baixo para o mais alto são:

- Ferramentas e centros de trabalho;
- Planta de manufatura;
- Cadeia de abastecimento interna;
- Cadeia de abastecimento ponta-a-ponta.

Enquanto que os modelos de simulação do nível mais baixo concentram-se em peças únicas de equipamento ou em uma única área de trabalho, o segundo nível abrange todo o chão de fábrica, por exemplo, todas as áreas de trabalho de uma fábrica de semicondutores. O terceiro nível modela a cadeia de abastecimento da empresa como um todo, incluindo todos os subcontratados e fundidores de silício. Por último, o quarto nível integra todos os participantes da cadeia de abastecimento da empresa de semicondutores, incluindo clientes, consumidores finais, fornecedores primários e fornecedores de matéria-prima. Cada nível seguinte inclui em si o nível anterior. A Figura 2.3 mostra os quatro níveis de simulação na indústria de semicondutores.

De notar que os esforços de simulação em qualquer um dos níveis podem contribuir para o desenvolvimento da estratégia de fabricação de semicondutores. Este suporte varia de decisões de curto prazo no chão de fábrica a decisões de longo prazo, por exemplo, determinar uma estratégia de fabricação apropriada.

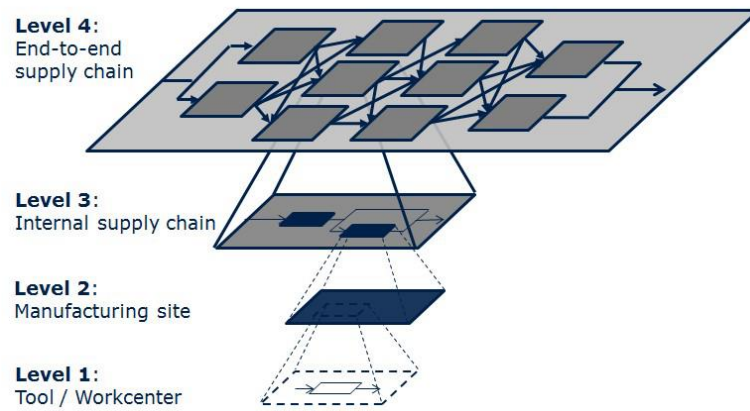


Figura 2.3. 4 níveis de simulação na indústria de semicondutores (Fowler et al., 2015)

3. CASO DE ESTUDO

Atualmente, o sistema de manuseamento de materiais inter-área da empresa em estudo é em parte manual e em parte automático, realizado por um AGV. Contudo, o transporte automático atualmente implementado não está otimizado, pelo que existem lotes que precisam ser transportados manualmente por forma a evitar elevados tempos de espera. Surge então a necessidade de otimizar o transporte automático atual e estudar o impacto que teria a implementação de um transporte entre áreas totalmente automatizado, nomeadamente, na prevenção de falhas, nos tempos de transporte e na redução de WIP.

Neste capítulo é feita a apresentação da empresa onde o trabalho foi realizado, a análise da situação atual e a descrição do problema.

3.1. Situação atual

O sistema de transporte de materiais da empresa resume-se em dois *mizusumashi*, um manual, com recurso a um comboio logístico, e outro automático, com recurso a um AGV. Ambos os transportes se encontram devidamente expostos nos pontos que se seguem.

3.1.1. Mizusumashi manual

O *layout* do chão de fábrica encontra-se representado na Figura 3.1. A empresa utiliza um *layout* celular, tal como foi descrito no capítulo 2 como sendo a norma na indústria de semicondutores. Este *layout* produtivo é caracterizado pela sua divisão em células/áreas que nada mais são do que um conjunto de máquinas com funções semelhantes. Após informações fornecidas pela empresa, o *layout* foi agrupado em 7 áreas: Litografia, Dry/Wet, Metrologia, LBS, Recon, WaferPrep e WaferProbe.

O transporte intra-área é inteiramente feito pelos deslocamentos dos colaboradores entre máquinas carregados com as FOUPs. Como as distâncias entre máquinas da mesma célula são muito reduzidas, não será estudado nenhum sistema de transporte diferente do carregamento manual. No entanto, a distância entre máquinas de

diferentes áreas é significativa, razão pela qual foi desenvolvido o *mizusumashi* manual atual. O *mizusumashi* manual é utilizado para o transporte inter-área do módulo II. A rota e os entrepostos deste sistema de transporte encontram-se representados na Figura 3.2.

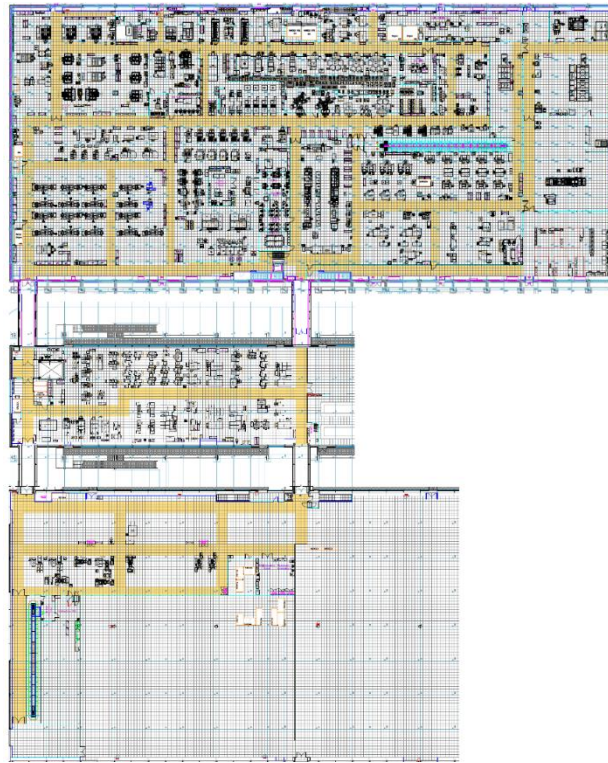


Figura 3.1. *Layout* do chão de fábrica

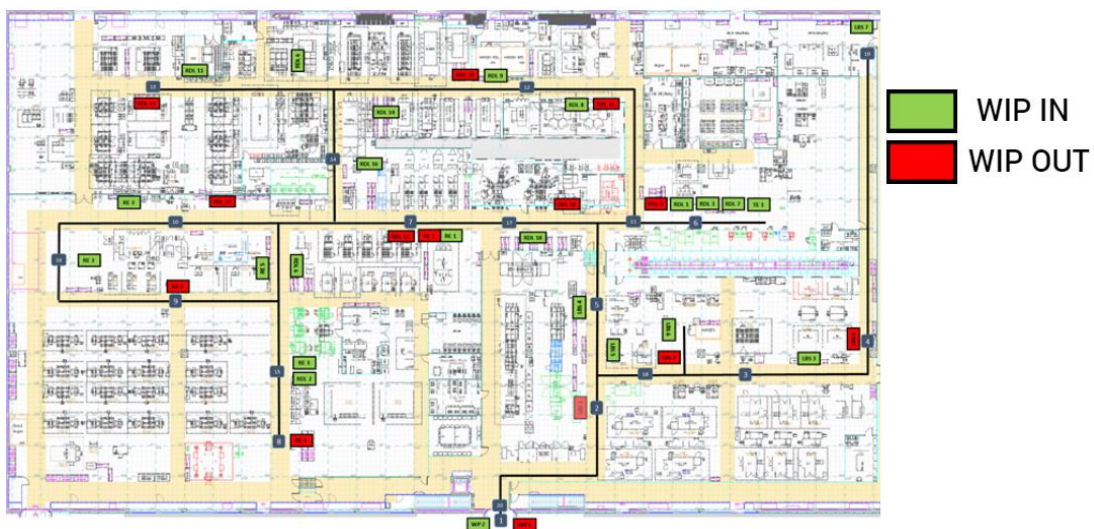


Figura 3.2. Rota e entrepostos do *mizusumashi* manual

Atualmente, a rota tem um total de 30 minutos e é efetuada ininterruptamente durante as 24h, significando um total de 24 repetições por dia e 12 por turno, tal como pode representado na Figura 3.3. As duas últimas rotas de cada turno são exceção à regra, em que o ciclo tem apenas 45 minutos para assegurar que a passagem de turno ocorre sem problemas.

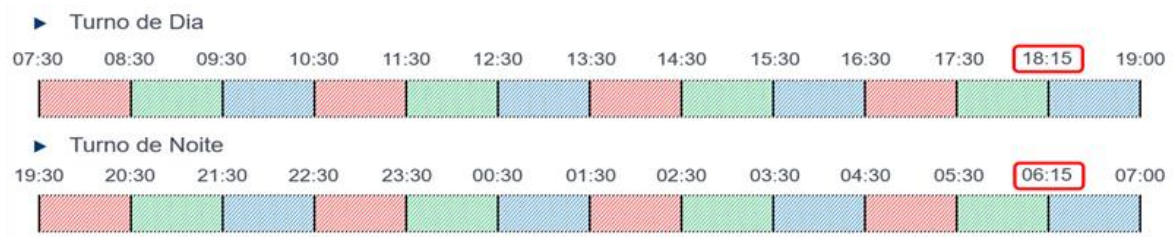


Figura 3.3. Horário do *mizusumashi* manual

O sistema de identificação de lotes é feito com o recurso a cartões identificativos, semelhantes aos cartões *kanban*. Todos os lotes colocados nos entrepostos de saída do *mizusumashi* devem estar devidamente identificados com um cartão identificativo, Figura 3.4, onde no retângulo inferior está representado o entreposto para o qual o lote terá que ser transportado e no superior o entreposto de saída. O cartão só deve ser retirado do lote quando este já se encontra no entreposto de chegada. Estes cartões têm como principal finalidade auxiliar o transporte de WIP (lotes produtivos) entre processos (*steps*) e encontram-se localizados no suporte existente em cada um dos pontos de paragem/entrepostos. No decorrer da sua rota, o *mizusumashi* recolhe os lotes de todos os entrepostos de saída e transporta-os até o *step* de destino. Quando o entreposto de entrada coincide com o *step* de destino identificado no cartão do lote, o operador deixa o lote nesse entreposto, remove o cartão identificativo e coloca-o no suporte do comboio logístico. Por fim, o operador *mizusumashi* deve recolher todos os cartões identificativos do suporte do comboio e colocá-los no suporte dos entrepostos de onde foram recolhidos.



Figura 3.4. Cartão identificativo

A distribuição dos cartões identificativos é feita no fim da rota. Após isto, o colaborador deve voltar ao seu posto de trabalho para efetuar as suas atividades normais. É importante que a hora de partida seja rigorosamente cumprida.

O comboio logístico atualmente tem capacidade para 12 lotes. Os lotes prioritários, que tenham janela de tempo definida, que estejam à atenção da Engenharia ou que tenham estado em *hold* (lote parado para análise) podem ou não ser integrados na rota *mizusumashi*, dependendo do volume de produção corrente.

Entende-se como entreposto um local onde são temporariamente armazenados os lotes (Figura 3.5) processados ou por processar de um determinado processo ou conjunto de processos. Este armazenamento é feito em estantes de inventário como a representada na Figura 3.6. Os entrepostos podem relacionar-se entre si na forma de 1 para 1 Figura 3.7, 1 para n Figura 3.8, e n para 1 Figura 3.9. A movimentação dos lotes produtivos nos entrepostos de entrada e/ou de saída de um ou mais processos, deve ser efetuada de acordo com o sistema FIFO. O procedimento FIFO tem como finalidade garantir a sequência correta de transporte dos lotes.



Figura 3.5. FOUN



Figura 3.6. Estante

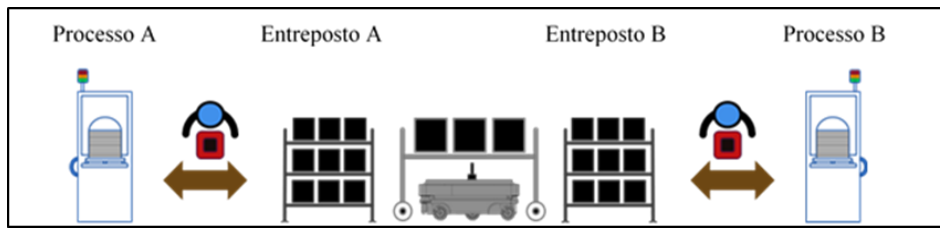


Figura 3.7. Entrepósitos 1 para 1

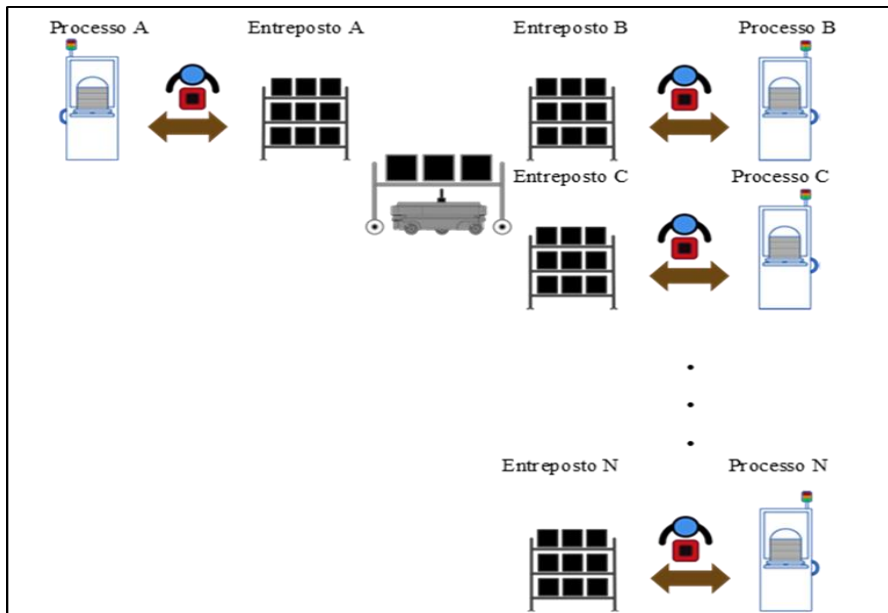


Figura 3.8. Entrepósitos 1 para n

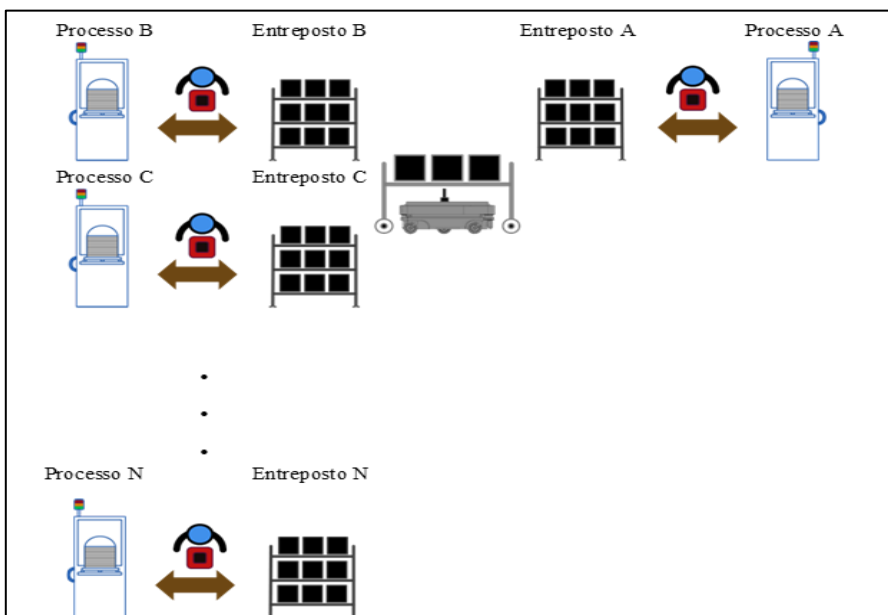


Figura 3.9. Entrepósitos n para 1

3.1.2. Mizusumashi automático

O *mizusumashi* automático é, à semelhança do *mizusumashi* manual, utilizado para o transporte inter-área, mas este é responsável pelo transporte entre as áreas de WaferProbe, WaferPrep e LBS. Cada módulo liga-se ao próximo através de 2 corredores, sendo que os corredores em que o AGV passa são exclusivamente para o robot. As rotas e os entrepostos deste sistema de transporte, assim como o local de carregamento do AGV, encontram-se representados na Figura 3.10.

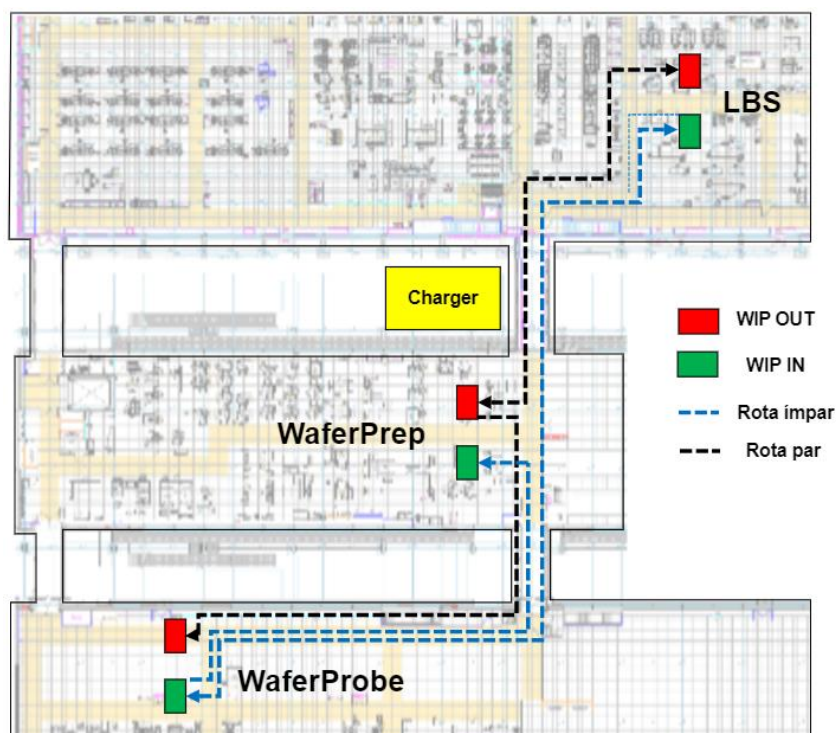


Figura 3.10. Entrepostos, posto de carregamento e rotas do *mizusumashi* automático

Tal como representado na Figura 3.10, há 2 rotas diferentes, denominadas de rota par e rota ímpar, que são feitas intercaladamente com um intervalo de 60 minutos. São efetuadas sem interrupção durante as 24h, resultando em 12 rotas de cada tipo por dia, e não têm alteração do horário aquando da mudança de turno. As rotas e o respetivo horário encontram-se representados na Figura 3.11.



Figura 3.11. Horário do *mizusumashi* automático

O transporte destas rotas é assegurado pelo AGV MiR200. As características deste veículo encontram-se esquematizadas na Figura 3.12.

Automated Guided Vehicle - properties						
Ride Capacity [kg]	Initial Desire Speed [meters per second]	Load Time [s]	Unload Time [s]	Autonomy [h]	0-100% charging time [h]	Safety sensors
200	1.1	35	35	0.25	2.5	Laser and ultrasonic scanners, 3D camera

Figura 3.12. Propriedades do AGV MiR200

Os valores relativos aos tempos de movimentação entre áreas encontravam-se na base de dados da empresa e irão servir de *input* para modelar os tempos de deslocamento. Os valores das movimentações isoladas entre áreas foram então estimados, assim como o tempo de movimentação total de cada rota. Estes valores encontram-se na Figura 3.13.

Rota ímpar				time	min
charger	to	wprep		00:01:33	1.55
wprep	to	lbs		00:03:13	3.22
lbs	to	wprep		00:03:30	3.50
wprep	to	wprobe		00:03:44	3.73
wprobe	to	wprobedescanso		00:00:36	0.60
wprobedescanso	to	charger		00:02:42	2.70
		total		0:15:18	15.30

Rota par				time	min
charger	to	wprobe		00:03:34	3.57
wprobe	to	LBS		00:05:11	5.18
LBS	to	wprobe		00:06:16	6.27
wprobe	to	wprep		00:03:22	3.37
wprep	to	gate		00:01:20	1.33
gate	to	charger		00:00:35	0.58
		total		0:20:18	20.30

Figura 3.13. Tempos de movimentação isolados entre áreas e tempo total de cada rota

Este sistema de transporte abastece apenas 3 áreas produtivas, WaferProbe, WaferPrep e LBS. As áreas de WaferProbe e LBS têm 3 entrepostos associados, 2 *move-outs* para cada rota e 1 *move-in*. Por uma questão de espaço, a área de WaferPrep tem apenas dois entrepostos, 1 *move-out* e 1 *move-in*. Após começar a sua rota, o AGV parte do local de carregamento e dirige-se ao entreposto de *move-out* da primeira área da rota em questão. Aí vai carregar a estante com os respetivos lotes e levá-la para o entreposto de chegada da área de destino. Os operadores é que estão responsáveis por colocar os lotes nas estantes para fazerem *move-out* e por retirar os lotes das estantes que fazem *move-in*. Tal como no *mizusumashi* manual, cada lote tem a si associado um cartão identificativo.

O local de repouso do AGV é o local de carregamento, localizado no corredor que liga a área WaferPrep à área LBS (Figura 3.10). Quando o AGV termina a sua rota, dirige-se ao local de repouso onde aguarda pela próxima rota. Nesse intervalo de tempo, de aproximadamente 40min, o AGV carrega a sua bateria de volta aos 100%.

3.2. Descrição do problema

O *mizusumashi* automático em vigor foi implementado apenas com o conhecimento empírico dos engenheiros industriais. Quando analisada a taxa de movimentação do AGV, aproximadamente 34%, constatou-se um valor muito baixo comparado com aquilo que seria desejável.

$$\text{Taxa de movimentação}(\%) = \frac{\text{Tempo de movimentação do AGV}}{\text{Tempo total}} = \frac{41\text{min}}{120\text{min}} \approx 34\% \quad (3.1)$$

Dentro deste valor, que representa a percentagem do tempo em que o robot está a mover-se, apenas 24% desse tempo é que é de facto transportado alguma coisa, valor que representa a taxa de utilização. No restante tempo, o robot está a movimentar-se vazio (sem lotes, apenas a estante vazia). Dito isto de outra forma, a taxa de trabalho útil é de apenas 8%.

$$\begin{aligned} \text{Taxa de utilização}(\%) &= \text{Taxa de utilização} * \text{Taxa de realização} = 34\% * 24\% \\ &\approx 8\% \end{aligned} \quad (3.2)$$

Como referido no subcapítulo 2.4, o desperdício associado ao transporte interno de materiais na indústria de semicondutores representa cerca de 20-50% do custo total do produto. Desta forma, é crucial que este desperdício seja reduzido ao máximo possível. Com a utilização do sistema de transporte automático atual, os lotes perdem muito tempo com atividades relacionadas ao transporte, ou seja, o tempo que ficam em *hold* nos entrepostos de saída para serem transportados acrescido ao tempo das próprias movimentações. Em média, o tempo de transporte de cada lote (tempo de espera + tempo de movimentação) é de 67.8min, com um desvio padrão de 39.9min e um máximo de 319min. Além disso, há lotes que são transportados manualmente. Essa situação ocorre quando em determinado posto de saída estão mais do que 4 lotes em espera aquando da passagem do AGV. Nesta situação, o robot vai recolher os 4 primeiros lotes, seguindo a lógica FIFO, e os restantes vão aguardar pela próxima rota. Como cada rota tem um tempo de ciclo de 2 horas, por vezes os lotes são necessários antes da próxima rota. Nesta situação, um operador vai transportar o lote à mão. Esta situação é totalmente indesejável, pois um operador fica afastado do posto de trabalho e perde imenso tempo para fazer um transporte que deveria ser feito pelo AGV.

Após uma análise aos dados relativos às movimentações de lotes dos primeiros 3 meses do ano, constatou-se também que as rotas WaferPrep-LBS e LBS-WaferPrep têm um número de movimentações muito superior às restantes (Figura 3.14. Número de lotes por rota nos primeiros 3 meses do ano Figura 3.14). No entanto, o sistema de transporte *mizusumashi* atual não tem isso em conta. Independentemente do volume de lotes transportados em cada trajeto, o robot sempre vai realizar as mesmas rotas. Este facto contribui para que a taxa de trabalho útil seja tão baixa, já que para dar resposta aos elevados volumes de transporte dos trajetos WaferPrep-LBS e LBS-WaferPrep, o robot vai fazer várias viagens vazio nos outros trajetos.

Devido aos motivos descritos acima que, resumidamente, são a baixa taxa de trabalho útil do AGV, elevados tempos médios de espera, necessidade de lotes serem transportados à mão e grandes discrepâncias nos volumes de transporte entre trajetos, surge a necessidade de estudar e otimizar outros métodos de transporte que tenham em consideração as diferenças nos volumes de transporte e aumentem a taxa de trabalho útil do AGV, reduzindo dessa forma os tempos médios de espera e eliminando a necessidade de transportar lotes manualmente.

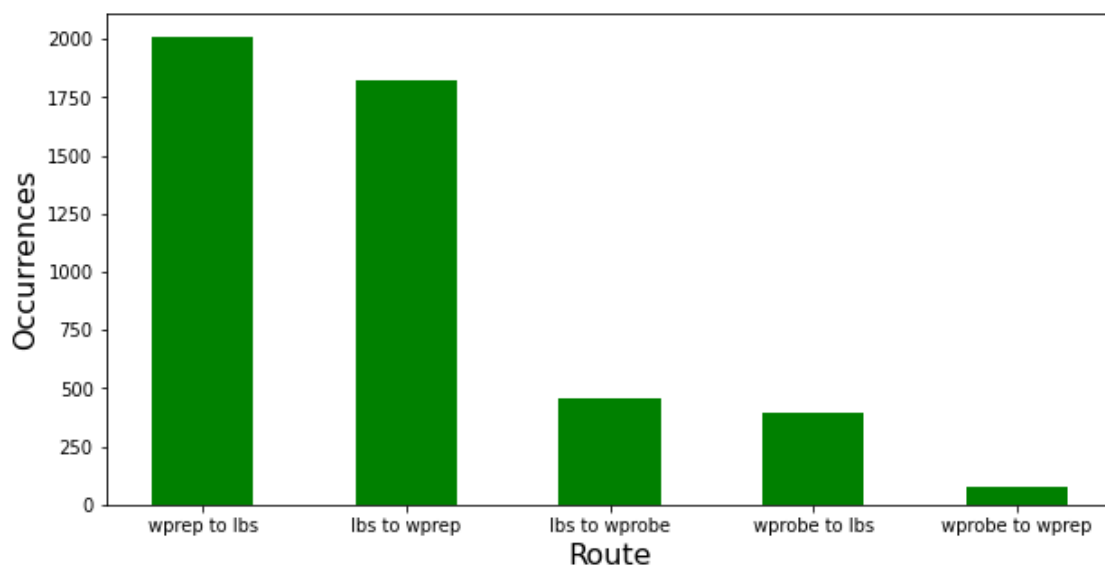


Figura 3.14. Número de lotes por rota nos primeiros 3 meses do ano

O sistema automático de transporte atualmente usado pela empresa tem algumas lacunas e não está otimizado, no entanto, a inclusão de um robot no sistema de transporte interno de materiais foi um sucesso. Esta conquista abre portas para que seja estudada a automatização de todo o sistema de transporte inter-área, que como já foi referido, é atualmente feito em grande parte por um *mizusumashi* manual. Apesar das vantagens deste sistema de transporte, desde logo, a redução da distância percorrida pelos operadores para efetuar o transporte de lotes produtivos e o consequente aumento da sua taxa de presença nos postos de trabalho, este sistema apresenta algumas desvantagens, nomeadamente:

- Impacto negativo no tempo de ciclo;
- Operador dedicado ao *mizusumashi* sem disponibilidade para trabalhar no equipamento produtivo;
- 4 operadores dedicados à atividade;
- Sem espaço para aumentar a rota nem acomodar alterações ao *TacktTime* sem a necessidade de aumentar o número de operadores dedicados à atividade. Este problema torna-se particularmente relevante pelo facto de que a produção a curto-médio prazo vai duplicar, pelo que serão precisos mais transportes e está a ser estudada a expansão da área produtiva.

Estas desvantagens acima listadas, juntamente com o facto de parte do transporte inter-área já ser automático, motivam o estudo da automatização do *mizusumashi* manual,

com o objetivo de avaliar a redução que essa implementação teria no peso dos transportes no tempo de ciclo assim como a melhoria na eficiência de pessoas e processos.

4. METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo é exposta a metodologia utilizada para resolver o problema anteriormente exposto. A complexidade do sistema produtivo faz com que se torne quase impossível avaliar o desempenho de um método de transporte através de modelos matemáticos ou heurísticas. A simulação de eventos discretos é uma ferramenta amplamente usada para este efeito em algumas empresas de semicondutores (Fowler et al., 2015). A partir dos dados históricos da produção dos primeiros 3 meses do ano, foi simulado o comportamento de 4 métodos de transporte distintos. Depois de verificado e validado, o modelo permite avaliar o comportamento dos métodos em estudo para diferentes níveis de produção. O próximo passo consistiu em usar as metas produtivas para as próximas 34 semanas para simular o comportamento dos diferentes métodos de transporte quando há um aumento da produtividade. A metodologia encontra-se resumida na figura F.

O modelo foi desenvolvido através do pacote de simulação do Python, SimPy, e por uma *framework* de código aberto para visualização de dados, Streamlit. Por meio desta *framework* foi desenvolvida uma aplicação *web* interativa, onde é feito o carregamento dos dados necessários e onde são ilustrados os principais resultados, tanto em formato de tabela como em formato gráfico.

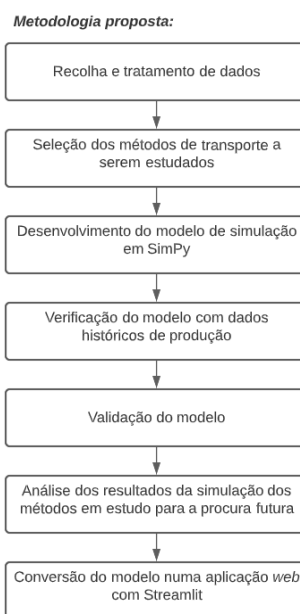


Figura 4.1. Metodologia proposta

4.1. Análise geral

A indústria de semicondutores é caracterizada pelo seu sistema de manufatura extremamente complexo. Como mencionado por Uzsoy e Martin-Vega, vê-se nesta indústria grandes fluxos reentrantes, alta complexidade de processo, elevados níveis de WIP, partilha de máquinas e prazos de entrega exigentes. Estas características resultam na necessidade de muito manuseamento e transporte de lotes de *wafers* em chão de fábrica (Zhang et al., 2016).

A maioria das fábricas modernas de semicondutores e as que estão a ser projetadas num futuro próximo usam um *layout* dividido em áreas, *layout job-shop*. (Peters & Yang., 1997). Tipicamente, cada área contém equipamentos com funções semelhantes, por exemplo, uma área com implantadores de iões. A escolha deste *layout* deve-se à facilidade de instalar equipamentos, de fazer a manutenção e à flexibilidade para acomodar mudanças no fluxo do processo. Esta configuração de *layout* e a existência de fluxos reentrantes faz com que os lotes percorram grandes distâncias numa área relativamente pequena, assim como provoca elevados fluxos de material entre áreas (movimentações inter-área) (Pierce & Stafford., 1994).

O foco do presente trabalho está nos transportes inter-área da fábrica. Para este efeito, será estudado o comportamento atual do AGV que se encontra em funcionamento, responsável pelo transporte entre as áreas de WaferProbe, WaferPrep e LBS.

As áreas entre as quais o AGV opera estão representadas na Figura 3.10.

4.2. Métodos de transporte em análise

Como mencionado no subcapítulo 2.3.1.1, o sistema *mizusumashi* pode ser dividido em 2 métodos distintos: método de revisão periódica e método de revisão contínua (*ceaseless reviewing*).

Atualmente, o método utilizado é o método de revisão periódica, em que uma rota par e uma rota ímpar começam alternadamente de hora em hora. As rotas e a hora em que começam estão representadas na Figura 4.2 e na Figura 4.3.



Figura 4.2. Horário do *mizusumashi* automático

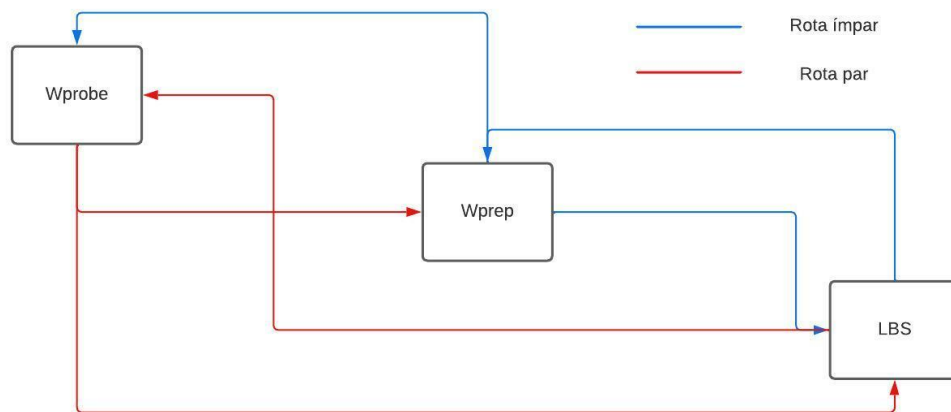


Figura 4.3. Rotas do *mizusumashi* automático

Este projeto tem como objetivo avaliar o comportamento do sistema com o método atual de transportes e comparar os resultados com outros métodos que serão explicados em seguida, nomeadamente:

- Método de revisão periódica com intervalos fixos;
- Método de revisão contínua;
- Método de táxi.

O método de revisão periódica com intervalos fixos tem um conceito muito semelhante ao método de revisão periódica atualmente em vigor, no entanto, em vez do intervalo entre o início das rotas ser fixo, no caso, 1 hora, o que é fixado é o intervalo entre o final da rota anterior e o início da rota seguinte. Com um propósito didático, o valor que será usado para avaliação dos resultados é o mínimo intervalo possível que garante que o robot tem tempo suficiente para recarregar a bateria após cada rota. Para calcular esse valor são necessários: taxa de carregamento, t_c ; taxa de consumo de bateria, t_b ; duração da primeira rota, r_1 ; duração da segunda rota, r_2 , e o número de intervalos, n . A expressão que obtém o valor pretendido é a seguinte:

$$\frac{t_b * (r_1 + r_2)}{t_c * n} = \frac{0.17[\%/min] * (18 + 23)[min]}{0.67[\%/min] * 2[intervals]} \approx 6min \quad (4.1)$$

No método de revisão contínua, as duas rotas fundem-se numa só, permitindo que o AGV as faça sem parar para carregar. O trajeto do AGV neste método é encontra-se esquematizado na Figura 4.4.

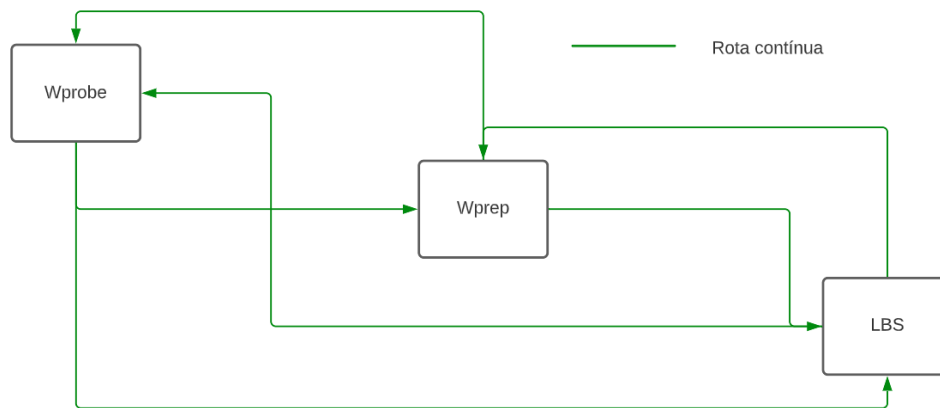


Figura 4.4. Rotas do método de revisão contínua

O facto de que o AGV não precisa de carregar faz com que o tempo perdido em deslocamentos do final da rota para o *charger* e do *charger* para o início da rota deixe de existir, o que, auxiliado ao tempo nulo de espera entre rotas consecutivas, resulta num tempo de ciclo significativamente menor quando comparado aos métodos de revisão periódica anteriores.

Este método apenas é possível com a utilização de 2 AGVs, de forma que, caso este método se torne o método mais vantajoso, o investimento em outro AGV terá de ser analisado em função dos ganhos da implementação desse sistema.

Por fim, no método de táxi, o AGV fica na zona de carregamento até que haja um pedido de transporte. Este pedido consiste num lote que fez *move-out* de uma máquina pertencente a uma das áreas da zona abrangida pelo *mizusumashi* automático e precisa de ser transportado para outra área dessa mesma zona. Após fazer um transporte, o robot verifica se, durante a movimentação, entrou outro pedido de transporte. Se entrou, o AGV dirige-se diretamente para a zona em questão e repete o processo. Caso contrário, dirige-se para a zona de carregamento e fica à espera do próximo pedido.

Os lotes são transportados seguindo uma lógica FIFO e, além disso, o AGV apenas começa um transporte se a bateria estiver acima de 30%, valor limite que garante que o transportador não fica sem bateria a meio de um percurso, situação que podia provocar danos indesejáveis.

O funcionamento do método de táxi encontra-se representado na Figura 4.5, através de um diagrama de estados.

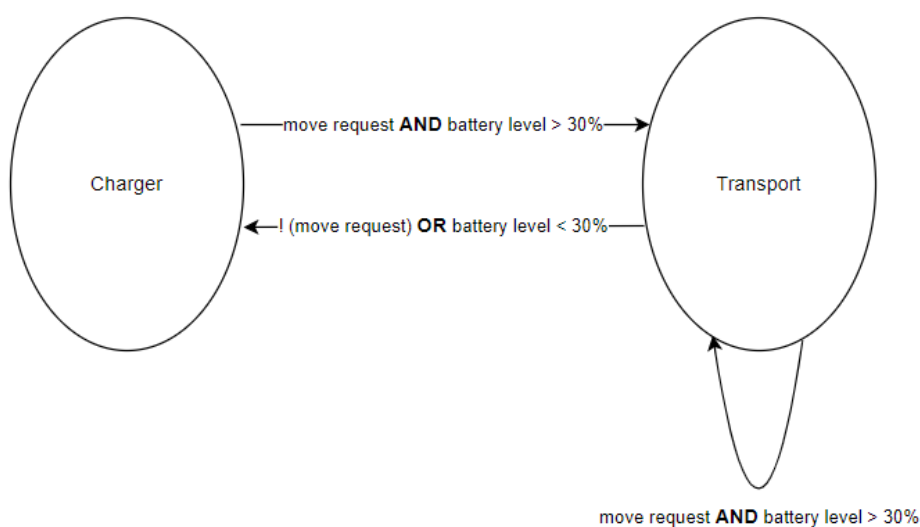


Figura 4.5. Diagrama de estados para o método de táxi

Os métodos em estudo encontram-se resumidos na Tabela 4.1:

Tabela 4.1. Resumo dos métodos de transporte em estudo

Método	Rotas fixas	Método de chamada	Número de AGVs necessários	Capacidade dos AGVs
Revisão periódica (Atual)	Sim	Periódico	1	4
Revisão periódica com intervalos fixos	Sim	Periódico	1	4
Revisão contínua	Sim	Contínuo	2	4
Táxi	Não	Produção (<i>move-outs</i>)	1	1

4.3. Conceitualização do modelo de simulação

A simulação de eventos discretos é um método bem estabelecido e bastante bem-sucedido em algumas empresas de semicondutores. A simulação é uma ferramenta maioritariamente usada para fazer avaliações de desempenho e para prestar auxílio à tomada de decisão (Fowler et al., 2015). Esta ferramenta foi utilizada para avaliar a performance dos diferentes métodos de transporte, analisar os resultados obtidos e retirar conclusões.

A primeira etapa consiste na recolha e tratamento dos parâmetros do modelo de simulação e também no delineamento da sua estrutura.

4.3.1. Nível de detalhe da simulação

Tal como descrito no subcapítulo 2.4.1, Fowler e os seus coautores identificam 4 níveis de simulação geralmente usados na manufatura de semicondutores. No âmbito deste projeto, o nível necessário é o segundo nível, planta de manufatura. Como vão ser modelados os transportes inter-áreas, naturalmente é necessário que toda a planta produtiva esteja incluída no modelo de simulação. No entanto, ao modelar sistemas com elevada complexidade, é obrigatório restringir o alcance do modelo aos elementos relevantes do sistema. Segundo Ward (1989), todo o modelo de simulação deve ser o mais simples possível, de modo que se torne uma ferramenta de análise intuitiva e computacionalmente viável. Dito isto, não foram modelados os processos produtivos dentro de cada área, já que apenas tem relevância para o modelo os transportes de materiais entre as áreas em estudo.

4.3.2. Entidades do modelo de simulação

O principal elemento de qualquer modelo de simulação são as suas entidades. Segundo Law (2015), um sistema que se pretende ver modelado é definido como um conjunto de entidades, por exemplo, pessoas ou máquinas, que agem e interagem entre si para a realização de algum fim lógico.

As entidades deste modelo de simulação são os lotes de *wafers*, chamados de FOUPs. Para este estudo, um transporte representa qualquer movimentação de uma ou mais FOUPs entre áreas diferentes. Tal como referido no subcapítulo 2.4, as FOUPs podem ter capacidade para 12 ou para 25 *wafers*, consoante sejam para *fan-out* ou para *fan-in*, respetivamente. Os lotes andam preferencialmente completos, no entanto, há algumas

exceções que resultam no transporte de lotes incompletos. Estas exceções passam por *steps* de *sampling*, *wafers* estragadas, *splits* dos lotes para otimização da utilização das máquinas e a própria *planning tool* pode dar ordens de produção de lotes incompletos. Este último acontece devido aos clientes fazerem os pedidos em *wafers*, pedidos esses que não são em função do tamanho de lote, o que normalmente faz com que pelo menos um lote por ordem de produção fique incompleto. Para este estudo, o lote estar completo ou incompleto é indiferente, pelo que não há diferenciação nas entidades por eles geradas.

4.3.3. Inputs do modelo de simulação

Os *inputs* de um modelo de simulação são os primeiros dados a entrar no processo, geralmente matérias-primas ou produtos acabados. Todos os *move-outs* que ocorrem na produção e os respetivos *timestamps* são guardados na base de dados da empresa. A partir desta informação, foram selecionados os *move-outs* que implicam uma mudança de área e que seja entre 2 áreas das quais o AGV está responsável por fazer o transporte. Todo este tratamento de dados foi feito em Google Colab, uma ferramenta em nuvem que permite criar e executar códigos com a linguagem Python. Após o tratamento, foi obtido um ficheiro em formato CSV com as colunas: Percurso; *Timestamp*; *Move-out area*; *Move-in area*; Quantidade de *wafers*, que servirá de *input* para simular o transporte da produção dos primeiros 3 meses do ano. No capítulo 5 será explicado como foram obtidos os dados para simular o comportamento do sistema de transportes para as próximas 34 semanas.

Além dos *inputs* relativos à quantidade de transportes, foi também necessário fornecer ao modelo os tempos de deslocamento do transportador em cada rota. A partir dos valores registados na Figura 3.13, foram estipulados os tempos de deslocação, que foram dados ao modelo sob a forma de uma tabela de dupla entrada, tabela T.

Tabela 4.2. Matriz dos tempos de deslocamento entre áreas

	Charger	Wprobe	Wprep	LBS
Charger	0 min	4 min	1 min	2 min
Wprobe	4 min	0 min	4 min	6min
Wprep	1 min	4 min	0 min	4min
LBS	2 min	6	4 min	0 min

4.4. Desenvolvimento do modelo de simulação

O modelo de simulação foi desenvolvido através do pacote de simulação do Python, SimPy, e por uma *framework* de código aberto para visualização de dados, Streamlit. O intuito deste subcapítulo é explicar o processo de construção do modelo e a forma como foram modelados alguns dos elementos mais relevantes, como é o caso do AGV.

4.4.1. SimPy overview

O SimPy é um pacote de simulação de eventos discretos do Python que funciona à base de processos, que é um dos três principais paradigmas de SED. Os processos são definidos através de funções e podem, por exemplo, ser usados para modelar componentes ativos como clientes, veículos ou agentes. As simulações podem ser realizadas “o mais rápido possível”, em tempo real, ou percorrendo manualmente os eventos.

A utilização desta ferramenta de simulação em relação a outras ferramentas amplamente utilizadas, como SIMIO ou SIMUL8, deve-se ao facto de que permite o desenvolvimento a nível da função, o uso de um sistema de controlo de versão como o *Concurrent Versions System* (CVS), pode ser autodocumentado com PyDoc e é extensível (Perrone et al., 2006). No contexto deste projeto, a vantagem mais apelativa é a integração do modelo de simulação com outras ferramentas de apoio à decisão, como modelos matemáticos e heurísticas que, à medida que se adicionarem novas áreas para incluir no transporte automático, a complexidade do modelo irá aumentar e a utilização destas ferramentas será imprescindível.

4.4.2. Estrutura do modelo de simulação

O modelo de simulação foi dividido em blocos de código chamados de classes (*class*). Em Python, uma classe é um projeto ou protótipo definido pelo utilizador a partir do qual os objetos são criados. As classes fornecem um meio de agrupar dados e funcionalidades. Para este projeto, o código desenvolvido foi agrupado em 5 classes, para as quais será feita uma breve e simples descrição da sua função.

Class Source: Responsável pela criação das entidades do modelo, os lotes. A partir dos dados recebidos do ficheiro em formato CSV descrito no subcapítulo 4.3.3, o

código nesta classe interpreta esses valores e atribui a cada *queue* os respetivos lotes com os respetivos tempos de criação.

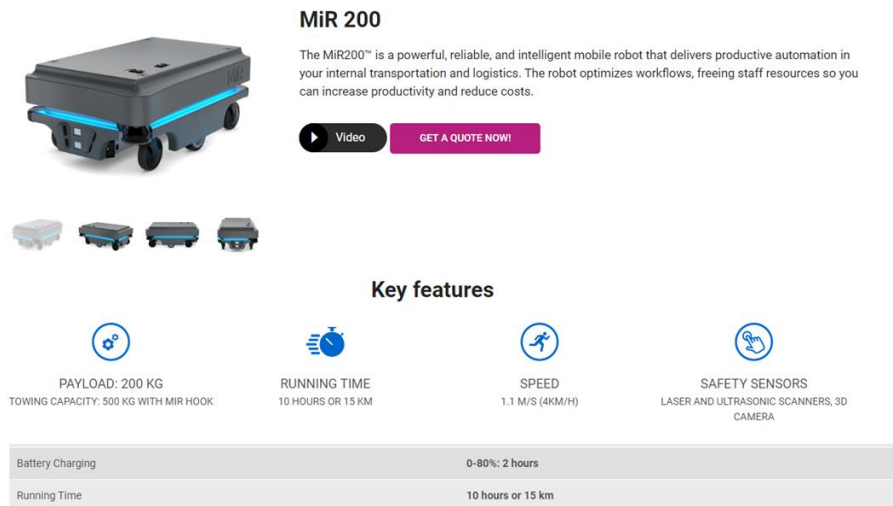
Class Transport: Nesta classe está delineada a lógica de transporte de todos os métodos. Para os métodos de rotas fixas, uma função *routeGen* é que está responsável por chamar esta classe conforme o intervalo entre transportes fornecido como *input* pelo utilizador. Por outro lado, no método de táxi, esta classe é chamada pela **Class Source**. Cada entidade produzida faz o pedido para ser transportada, e mal o recurso *agvR* tenha disponibilidade, o AGV vai fazer o transporte da entidade numa lógica FIFO.

Class AGV: Este objeto é responsável pela simulação do comportamento do AGV. O robot foi modelado como um *Resource* do módulo SimPy. Quando o recurso é chamado, é necessário fazer um *Request*. Caso o recurso esteja livre, vai realizar o pedido, caso contrário, o pedido fica em *queue* até que o recurso esteja disponível. O início e o final das rotas foram modelados com o auxílio de *Events*.

Os recursos do pacote de simulação SimPy não permitem a associação de variáveis. Desta forma, para a modelação da bateria do robot foi utilizado um *Container* com capacidade 100. Enquanto o *agvR* estiver a ser utilizado, a cada segundo é retirado do *Container* a bateria gasta nesse período de tempo. Quando o *agvR* estiver no Charger, é colocado no *Container* de segundo a segundo a quantidade de bateria que ele carregaria nesse intervalo de tempo. Por fim, é ainda utilizado outro *Event* para garantir que o robot não começa uma rota com a bateria inferior a 30%. As especificações que serviram de base para a modelação desta classe estão representadas na Figura 4.6 e na Figura 4.7.

Class Logger: Responsável pelo registo de todas as movimentações e operações que ocorram no modelo. Todas as classes descritas acima chamam esta classe cada vez que há uma operação que envolva uma entidade do modelo. Esta classe tem um papel fundamental para a verificação do modelo e para a visualização de resultados.

Class Dataprocessing: Processamento dos resultados obtidos na simulação. Esta classe é chamada no final da simulação e é responsável pelo tratamento e visualização dos *outputs* do modelo de simulação.



MiR 200

The MiR200™ is a powerful, reliable, and intelligent mobile robot that delivers productive automation in your internal transportation and logistics. The robot optimizes workflows, freeing staff resources so you can increase productivity and reduce costs.

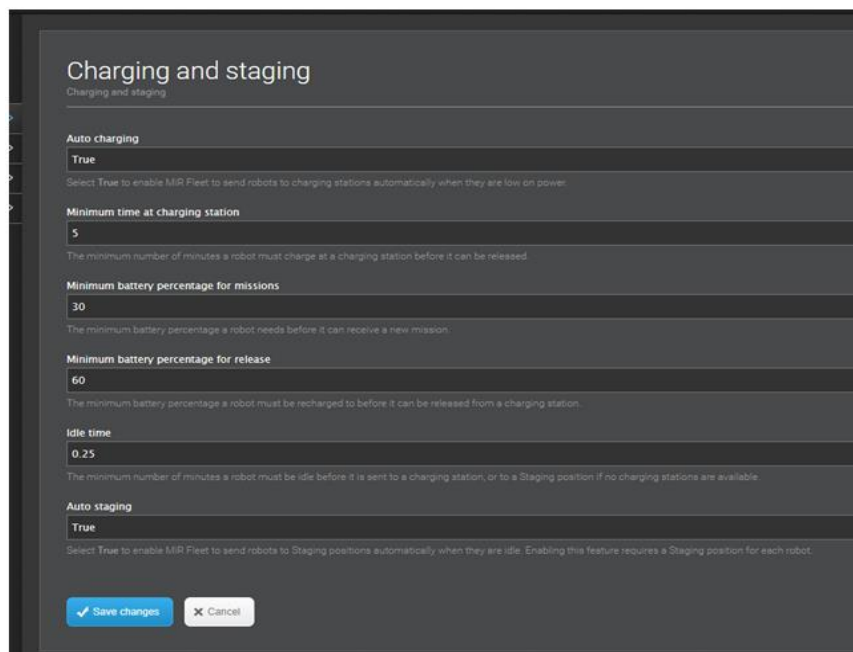
Video GET A QUOTE NOW!

Key features

- PAYLOAD: 200 KG
TOWING CAPACITY: 500 KG WITH MIR HOOK
- RUNNING TIME
10 HOURS OR 15 KM
- SPEED
1.1 M/S (4KM/H)
- SAFETY SENSORS
LASER AND ULTRASONIC SCANNERS, 3D CAMERA

Battery Charging	0-80%: 2 hours
Running Time	10 hours or 15 km

Figura 4.6. Características do AGV



Charging and staging
Charging and staging

Auto charging
True
Select True to enable MiR Fleet to send robots to charging stations automatically when they are low on power.

Minimum time at charging station
5
The minimum number of minutes a robot must charge at a charging station before it can be released.

Minimum battery percentage for missions
30
The minimum battery percentage a robot needs before it can receive a new mission.

Minimum battery percentage for release
60
The minimum battery percentage a robot must be recharged to before it can be released from a charging station.

Idle time
0.25
The minimum number of minutes a robot must be idle before it is sent to a charging station, or to a Staging position if no charging stations are available.

Auto staging
True
Select True to enable MiR Fleet to send robots to Staging positions automatically when they are idle. Enabling this feature requires a Staging position for each robot.

Save changes Cancel

Figura 4.7. Características do AGV

4.5. Verificação e validação do modelo de simulação

Um modelo de simulação apenas tem utilidade e credibilidade após verificado e, preferencialmente, validado. A verificação consiste em comprovar que os resultados da simulação correspondem aos resultados esperados, ao passo que a validação consiste em comparar os resultados obtidos com os valores reais.

No seu livro, Law explica 8 técnicas que podem ser usadas para fazer a verificação de qualquer modelo de simulação. Embora nem todas as técnicas sejam aplicáveis neste estudo, a maioria delas foram utilizadas, nomeadamente:

- Divisão do modelo em módulos/subprogramas e fazer a sua verificação;
- Revisão do código por outras pessoas;
- Correr a simulação sob determinados parâmetros e avaliar se os resultados estão dentro dos valores esperados;
- Fazer o rastreamento de entidades;
- Execução do modelo sob condições simplificadas para as quais os resultados verdadeiros do modelo sejam conhecidos ou possam ser facilmente calculados.

Um importante aspeto do modelo que necessita de validação é a matriz das distâncias que foi utilizada como *input* para ambos os métodos. Os métodos de rotas fixas já se encontram validados, no entanto, o modelo de táxi tem um funcionamento diferente, razão pela qual a matriz das distâncias que foi para ele criada precisa de validação. Para este efeito, foi desenvolvido um mapa de simulações que serve como amostra da aplicação do método de táxi. Este mapa foi posteriormente convertido em missões (movimentações do AGV), que foram todas cronometradas. O mapa de simulações está representado na Figura 4.8. O robot é controlado a partir de uma *dashboard* que pode ser vista no Anexo A.

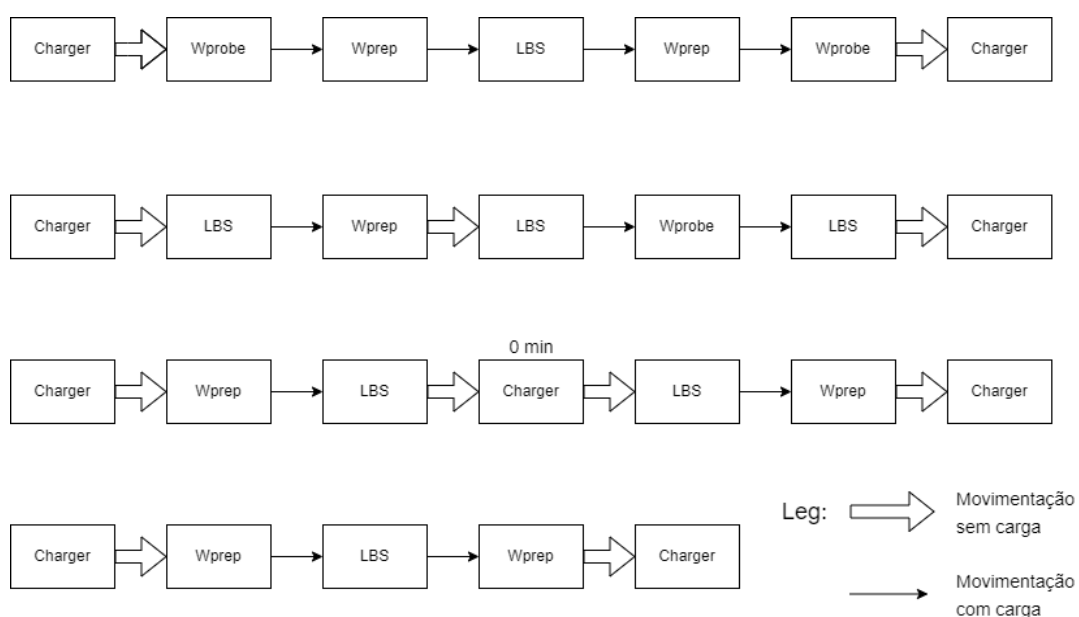


Figura 4.8. Mapa de simulações

As tabelas seguintes comparam a matriz estimada dos tempos do método de táxi com a matriz dos valores cronometrados.

Tabela 4.3. Matriz dos tempos de deslocamento estimados

	Charger	Wprobe	Wprep	LBS
Charger	0 min	4 min	1 min	2 min
Wprobe	4 min	0 min	4 min	6min
Wprep	1 min	4 min	0 min	4min
LBS	2 min	6	4 min	0 min

Tabela 4.4. Matriz dos tempos de deslocamento cronometrados

	Charger	Wprobe	Wprep	LBS
Charger	0 min	3 min 53s	1min 5s	2 min 7 s
Wprobe	3 min 49s	0 min	3min 57s	6 min
Wprep	1 min 2s	3 min 54 s	0 min	03 min 53 s
LBS	2 min 14s	6 min 6 s	4 min 8 s	0 min

Tabela 4.5. Matriz da diferença absoluta entre os tempos estimados e os tempos medidos

	Charger	Wprobe	Wprep	LBS
Charger	0	7s	5s	7s
Wprobe	11s	0	3s	0s
Wprep	2s	6s	0	7s
LBS	14s	6s	8s	0

A maior diferença entre os valores medidos e os valores estimados é de 14s, valor que não representa um impacto significativo nos resultados. Deste modo, conclui-se que a matriz das distâncias utilizada representa bastante bem a realidade, e por essa razão, os resultados são válidos.

4.6. Desenvolvimento da aplicação em Streamlit

4.6.1. Streamlit overview

Streamlit é uma *framework* de aplicações de código aberto que é geralmente usada para *machine learning* e ciência de dados. Esta ferramenta possibilita a construção de várias aplicações baseadas em poucas linhas de código em linguagem Python (Shukla et al., 2021). Para usufruir do serviço grátis de partilha do Streamlit, o código deve estar hospedado num repositório do GitHub (Parker et al., 2021). Neste repositório devem estar: o código fonte, todos os ficheiros que sirvam de *input* do modelo e da aplicação, nomeadamente, ficheiros CSV e imagens, e um ficheiro txt com todas as dependências externas usadas que não façam parte duma versão *standard* do Python (e.g. pacotes Simpy, Plotly). A aplicação é criada após feita a conexão do repositório do GitHub à conta Streamlit, de onde resulta um *link* com o *output* do modelo de simulação. Não há necessidade de codificar um *backend*, definir *paths*, gerir requisições HTTP, vincular a um *frontend* nem escrever HTML, CSS ou JavaScript (Shukla et al., 2021). Se o desenvolvedor da aplicação a tornar de acesso público, qualquer dispositivo que abra o *link* terá acesso aos resultados do modelo. Caso contrário, é necessário registar os e-mails das pessoas às quais se deseja dar permissão para o efeito.

Após gerada a aplicação, qualquer alteração no código fonte é imediatamente registada no núcleo da aplicação, que é atualizada com os novos resultados provocados por essa alteração. Outra característica muito apelativa desta aplicação é o facto de permitir que o utilizador altere parâmetros usados como *input* do modelo de simulação. Esta característica faz com que o utilizador possa manipular parâmetros chave do modelo e avaliar os resultados das simulações resultantes dessas mudanças.

4.6.2. Aplicação em Streamlit

O desenvolvimento da aplicação surgiu da necessidade de ter uma ferramenta dinâmica que não seja apenas usada para o estudo das rotas presente neste documento mas que possa também ser usada para fazer o estudo da automatização dos transportes das restantes zonas de produção. Em outras palavras, foi desenvolvida a aplicação como meio de exportar o modelo para que possa ser reutilizado para um estudo futuro com novas rotas e, naturalmente, mais AGVs.

A interface da aplicação encontra-se ilustrada na Figura 4.9 e Figura 4.10, e o restante da aplicação pode ser vista no Anexo B.

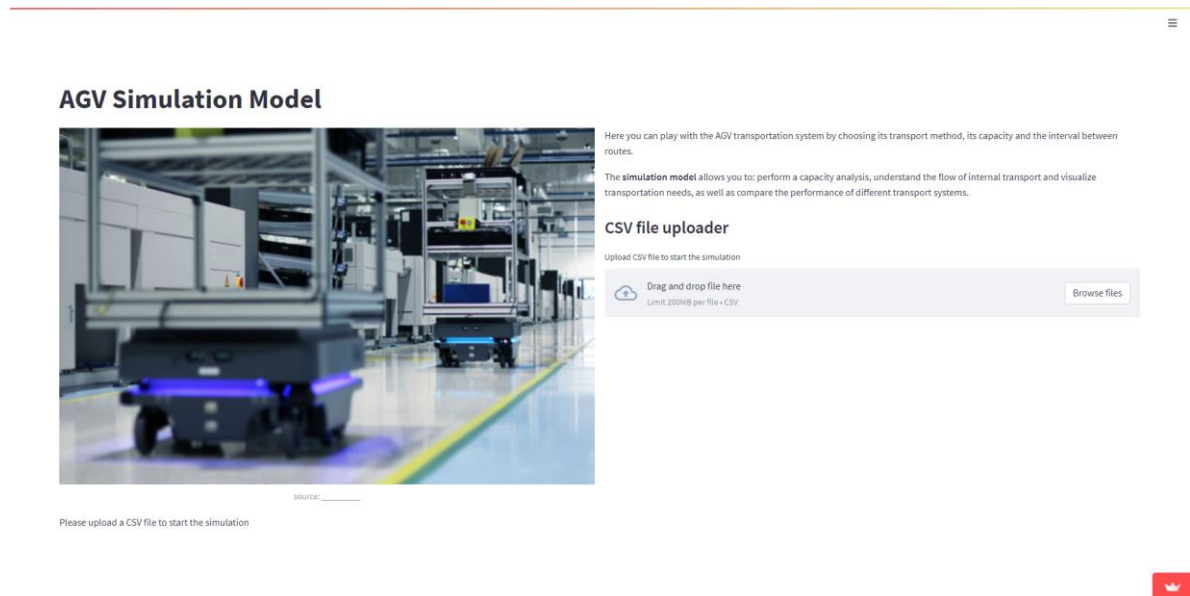


Figura 4.9. Interface da aplicação em Streamlit

	Current situation	Periodic reviewing	Ceasless reviewing	Taxi method
Transportation time	88.2	31.6	23.9	7.4
Average [min]	↑ 0	↓ -56.6	↓ -64.3	↓ -80.8
Transportation time	58.5	15.9	11.8	3.0
Std [min]	↑ 0	↓ -42.6	↓ -46.7	↓ -55.5
Transportation time	343.0	78.0	54.0	24.0
Max [min]	↑ 0	↓ -265.0	↓ -289.0	↓ -319.0
WIP	5.3	2.1	1.6	0.9
Average [lots]	↑ 0	↓ -3.2	↓ -3.7	↓ -4.4
WIP	3.0	1.5	1.3	0.8
Std [lots]	↑ 0	↓ -1.5	↓ -1.7	↓ -2.2
WIP	17	8	7	5
Max [lots]	↑ 0	↓ -9	↓ -10	↓ -12
Moving rate	34.42%	77.38%	100.0%	42.59%
Time moving/time stopped				

Figura 4.10. Interface da aplicação em Streamlit

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

No quinto capítulo desta dissertação são discutidos os resultados obtidos da implementação da metodologia exposta para dois volumes diferentes de produção, um com os *move-outs* dos lotes nos primeiros 3 meses do ano e outro obtido através das metas das próximas 34 semanas. O primeiro passo consiste em avaliar a performance dos diferentes métodos de transporte para o volume de produção dos primeiros 3 meses do ano, de seguida, é explicado como foram obtidos os transportes relativos às metas das próximas 34 semanas. Posteriormente, é avaliada a performance dos diferentes métodos para o novo volume de produção, são avaliados os resultados e tiradas conclusões acerca destes. Além disso, é feita uma análise fatorial para estudar o impacto nos resultados de alguns parâmetros de interesse e, finalmente, uma análise ao comportamento do sistema estudado para vários níveis de procura. Todas as representações gráficas deste capítulo são adaptadas da aplicação desenvolvida em Streamlit.

5.1. Resultados para a produção dos primeiros 3 meses do ano

Para obter os resultados para a produção dos primeiros 3 meses do ano foi fornecido um ficheiro com todos os *move-outs* dos lotes durante esse período de tempo, como já foi explicado no subcapítulo 4.3.3.

O principal objetivo de um sistema de transportes mais eficiente é reduzir o tempo que o produto “perde” a ser transportado. Dito isto, os histogramas seguintes mostram como varia o tempo de transporte para cada um dos métodos em estudo. O tempo de transporte foi calculado da seguinte forma:

$$T_{transporte} = T_{queue} + T_{movimentação} + T_{carga} + T_{descarga} \quad (5.1)$$

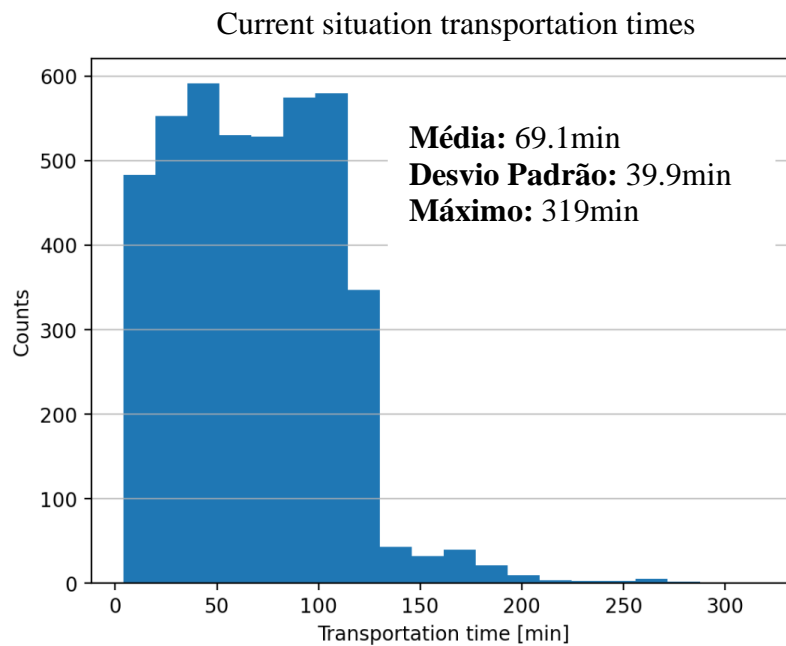


Figura 5.1. Histograma dos tempos de transporte para a situação atual para a procura passada

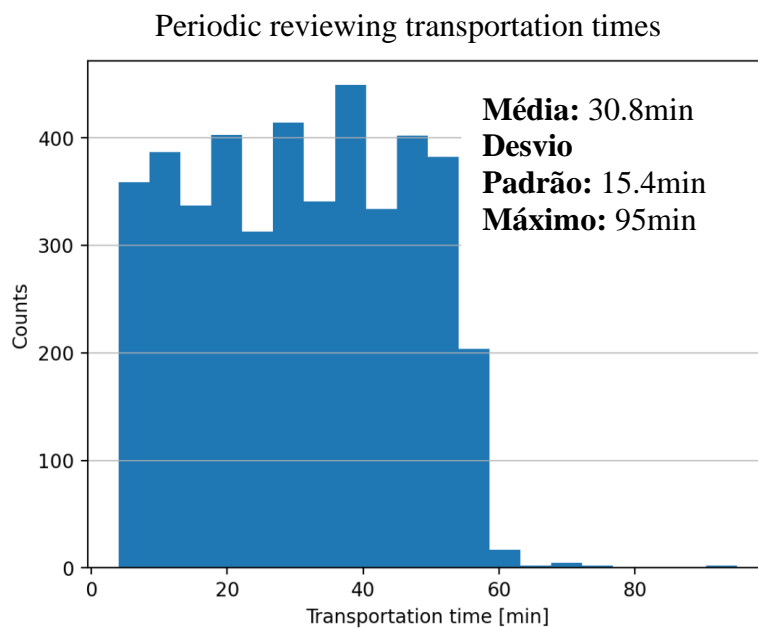


Figura 5.2. Histograma dos tempos de transporte para a método de revisão periódica para a procura passada

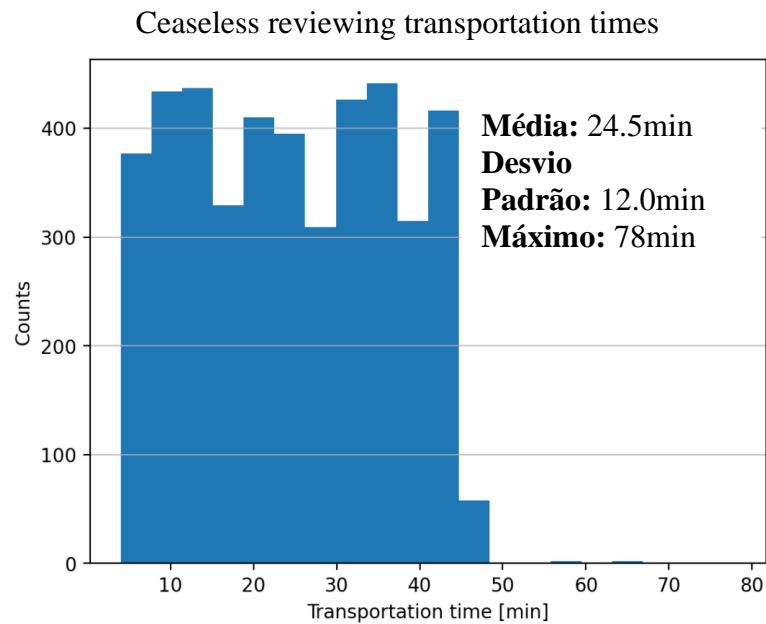


Figura 5.3. Histograma dos tempos de transporte para a método de revisão contínua para a procura passada

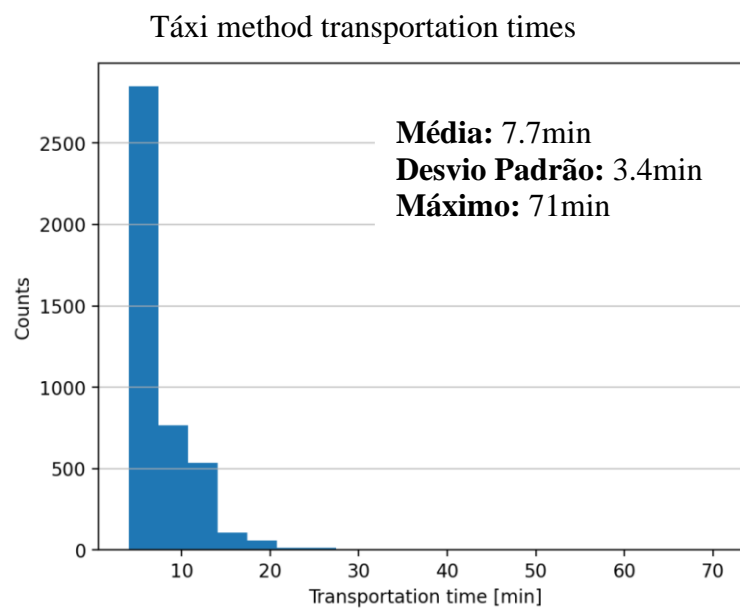


Figura 5.4. Histograma dos tempos de transporte para a método de táxi para a procura passada

Outro indicador de performance que se quer ver reduzido ao máximo numa otimização do sistema de transportes é o WIP. Devido às características das fábricas de semicondutores descritas nos capítulos anteriores, o desequilíbrio do WIP ocorre frequentemente, o que resulta em elevados níveis de manuseamento para lidar com o excesso de lotes no chão de fábrica em determinado momento. Estas operações têm um elevado

impacto no tempo de ciclo e no tempo disponível para cumprir os prazos de entrega. Deste modo, é essencial que sejam implementadas políticas de controlo de WIP para suavizar o fluxo de produtos e manter um nível baixo de WIP na fábrica (Zhou & Rose., 2012). Um sistema de transporte adequado é um dos requisitos para realizar tais objetivos.

A Tabela 5.1 mostra a variação de WIP para os 4 métodos de transporte:

Tabela 5.1. Variação do WIP para os 4 métodos de transporte com a procura passada

	WIP [lotes]			
	Média	Desvio padrão	Máximo	Mediana
Situação atual	2.6	2.0	13	2.0
Revisão periódica	1.2	1.2	10	1.0
Revisão contínua	1.0	1.1	8	1.0
Táxi	0.8	0.8	7	1.0

Além dos indicadores de performance acima analisados, é importante perceber a taxa de utilização dos veículos. Esta informação expõe questões importantes, nomeadamente, o tempo que o AGV viaja vazio. A taxa de utilização para os 4 métodos de transporte encontram-se ilustrados na Figura 5.5

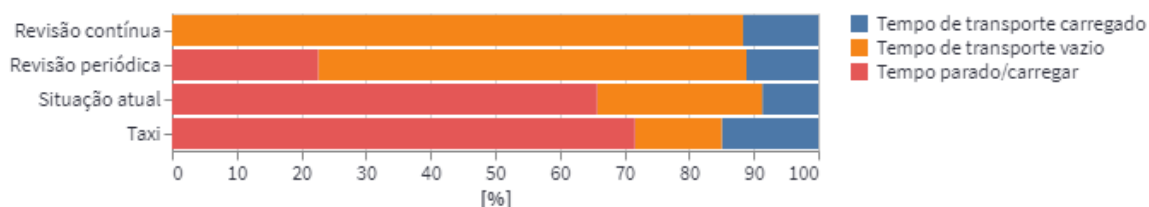


Figura 5.5. Taxa de utilização dos veículos para a procura passada

5.2. Resultados para as metas das próximas 34 semanas

5.2.1. Obtenção dos dados

Os dados que geram a produção estão em forma de metas semanais. Se determinado lote tiver uma meta de 400 *wafers* para a semana x , a *planning tool* vai receber essa informação e distribuir diariamente a quantidade de lotes a serem produzidos para que essa meta seja cumprida. Esta distribuição tem em consideração a disponibilidade das máquinas, o WIP atual e a *masterdata* de produtos e de fluxos produtivos. Todos estes fatores contribuem para que a produção diária varie significativamente de dia para dia.

Para simular o comportamento do sistema de transportes para a procura futura é necessário estimar a quantidade de transportes ao longo de cada dia. A informação disponível está em forma de metas semanais, pelo que, uma abordagem simplista possível seria dividir essa quantidade por 7 dias da semana e por 12 *wafers* por lote. No entanto, devido aos motivos descritos acima, a produção tem variações diárias significativas, pelo que assumir valores constantes de produção e, conseqüentemente, de transportes, não é uma boa representação do sistema real.

Ao analisar o histograma feito a partir dos dados históricos da produção dos primeiros 3 meses do ano, constatou-se que a quantidade de lotes diários parecia ter um comportamento de uma distribuição normal. O histograma encontra-se representado na Figura 5.6.

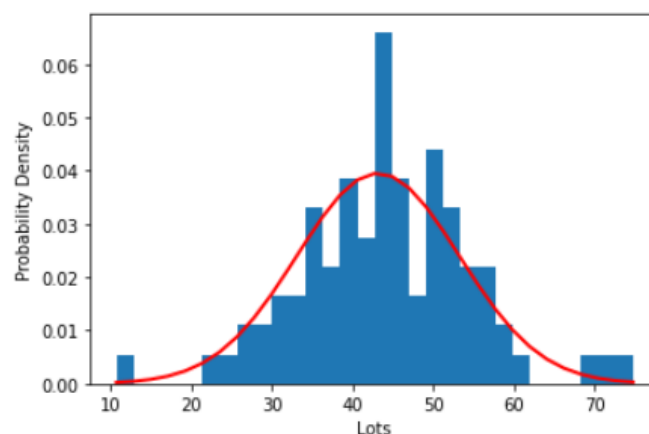


Figura 5.6. Histograma dos lotes diários da produção dos primeiros 3 meses do ano

Para verificar se os dados seguem de facto uma distribuição normal, foi feito um teste de normalidade, que pode ser visto na Figura 5.7. Analisando a figura, observa-se que o *p-value* é superior ao nível de significância de 0.05. Além disso, os pontos encontram-se distribuídos perto da linha, o que permite concluir que os dados históricos são bem modelados por uma distribuição normal de média 43.48 e desvio padrão de 11.29.

É sabido também que a mudança de turnos às 7h e às 19h afeta a produção e, conseqüentemente, a quantidade de transportes. Por este motivo, foi feita a distribuição ao longo do dia dos lotes transportados com um intervalo de 30min. A distribuição encontra-se representada na Figura 5.8.

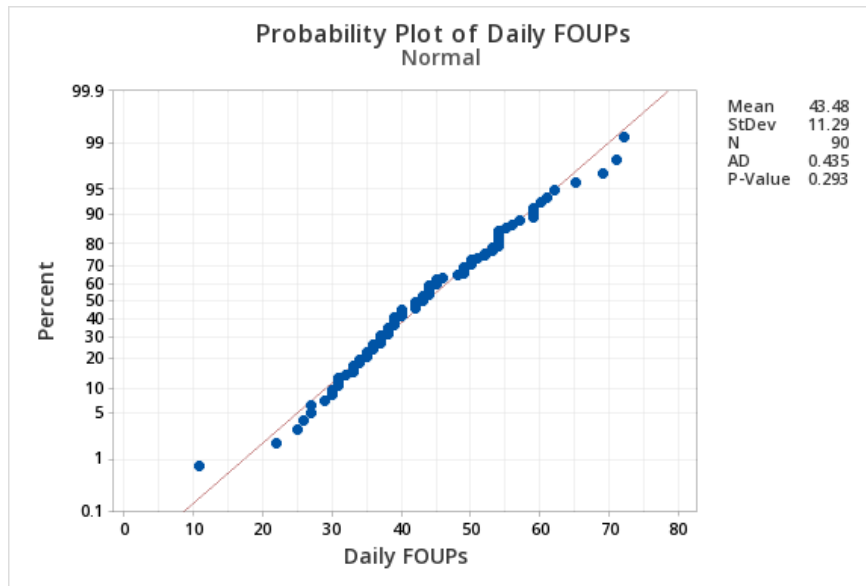


Figura 5.7. Teste de normalidade para a distribuição diária de FOUPs nos primeiros 3 meses do ano

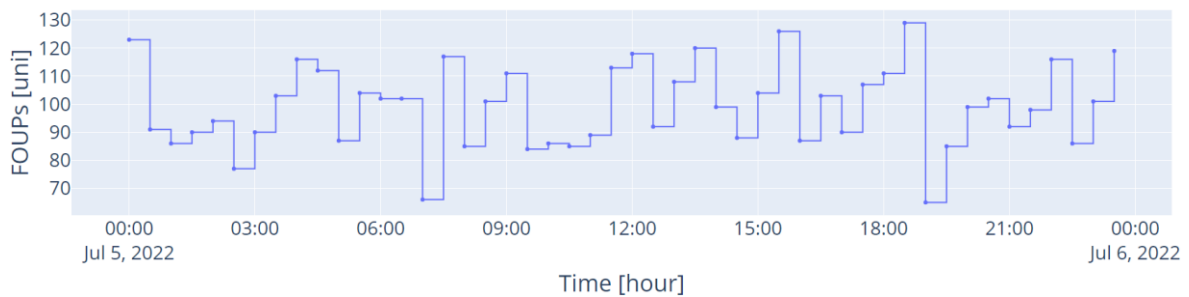


Figura 5.8. Distribuição das FOUPs ao longo do dia

Como esperado, há variações bruscas na quantidade de lotes transportados nos períodos das 6:30h às 7:30h e das 18:30h às 19:30h (Figura 5.8).

O próximo passo foi aplicar o comportamento observado nos dados históricos nas metas novas. Primeiro foi calculada a média de lotes diários, através da expressão:

$$\begin{aligned} \overline{\text{lotes diários}} &= \frac{\sum_i^{34} \text{metas}_i [\text{wafers}]}{34[\text{semanas}] * 7[\text{dias}] * \text{tamanho de lote} \left[\frac{\text{wafers}}{\text{lote}} \right]} \\ &= 82.05 \left[\frac{\text{lotes}}{\text{dia}} \right] \end{aligned} \quad (5.1)$$

Após este passo, foi aplicada a distribuição normal com a nova média e o mesmo desvio padrão. Finalmente, foi aplicada a distribuição diária através de pesos posicionais para obter a quantidade de lotes por cada 30min.

Para a estimativa de transportes baseada nas metas das próximas 34 semanas, os histogramas dos tempos de transporte obtidos para cada método de transporte encontram-se representados nas seguintes figuras:

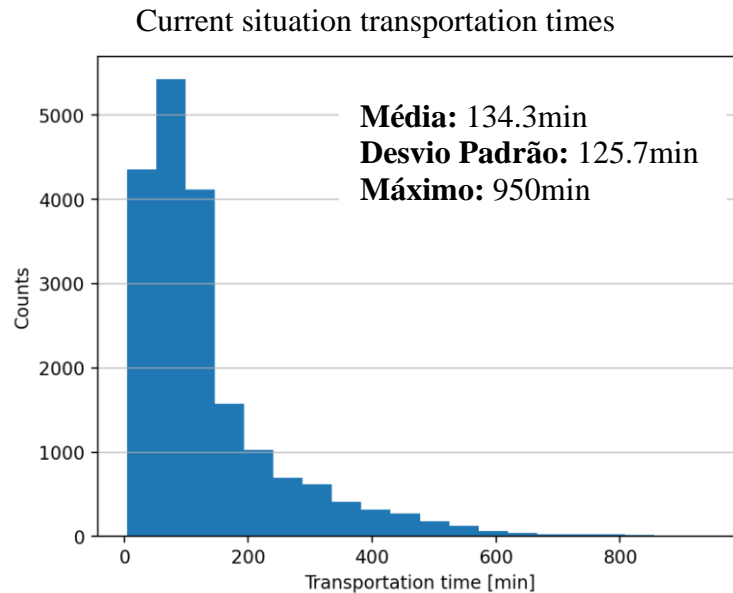


Figura 5.9. Histograma dos tempos de transporte para a situação atual para a procura futura

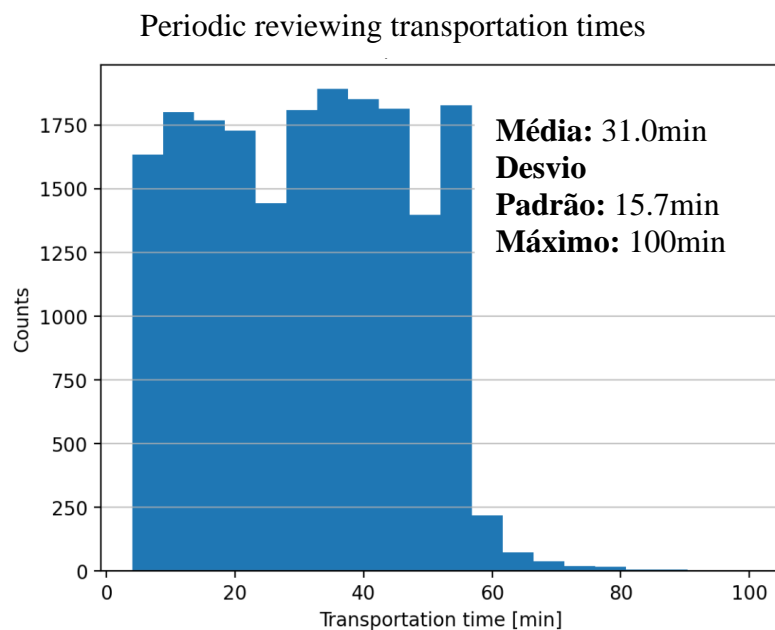


Figura 5.10. Histograma dos tempos de transporte para a método de revisão periódica para a procura futura

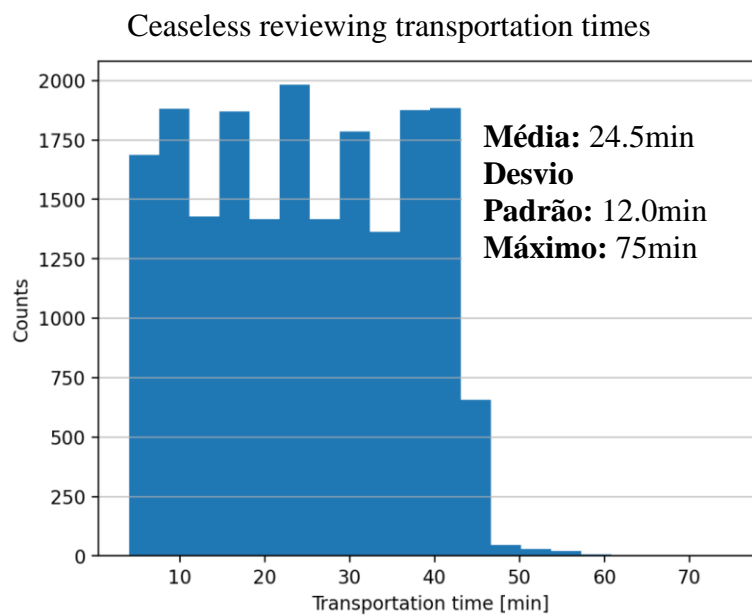


Figura 5.11. Histograma dos tempos de transporte para a método de revisão contínua para a procura futura

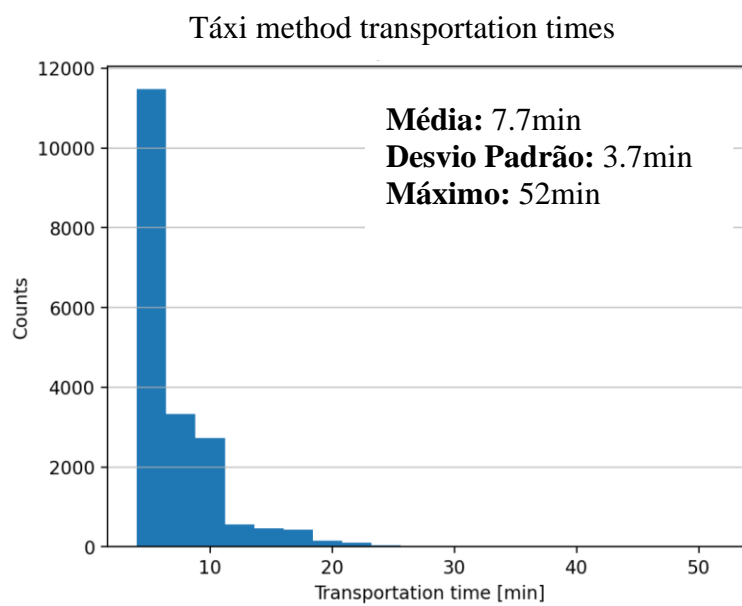


Figura 5.12. Histograma dos tempos de transporte para a método de táxi

A tabela T representa a variação do WIP com a nova procura, ao passo que a figura F ilustra a taxa de utilização dos veículos.

Tabela 5.2. Variação do WIP para os 4 métodos de transporte com a procura futura

	WIP [lotes]			
	Média	Desvio padrão	Máximo	Mediana
Situação atual	8.2	5.4	37	7.0
Revisão periódica	2.1	1.5	11	2.0
Revisão contínua	1.2	1.1	9	1.0
Taxi	0.9	0.9	9	1.0

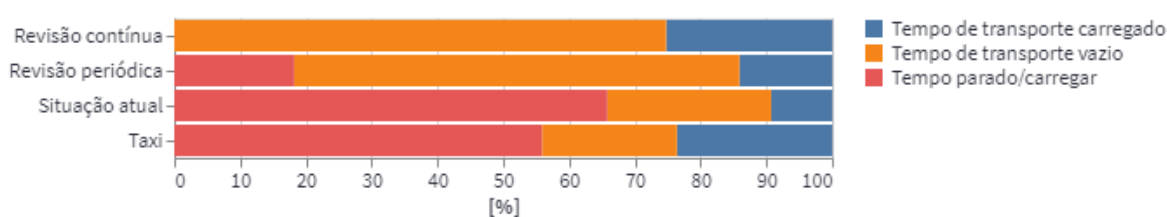


Figura 5.13. Taxa de utilização dos veículos para a procura futura

5.3. Análise e discussão de resultados

Quando analisado o comportamento do sistema para os novos níveis de produção decorrentes do aumento da procura para as próximas 34 semanas verificou-se um aumento do TC médio de 69.1min para 134.3min e os respetivos desvios padrão de 39.9min para 125.7min, assim como um aumento do WIP de um valor médio de 2.6lotes para 8.2lotes com os respetivos desvios padrão de 2.0lotes e 5.4lotes. Estes valores indicam que o sistema atual não vai conseguir dar resposta aos novos valores de procura. O aumento do tempo de ciclo verificado vai fazer com que as máquinas produtivas fiquem em *hold* à espera que os lotes sejam transportados, o que resulta num aumento do tempo de ciclo global do produto. Além disso, o atual sistema de transportes não está preparado para um aumento tão significativo de WIP. As estantes reservadas para armazenar os lotes em *queue* para serem transportados não são suficientes para satisfazer as novas necessidades, o que vai provocar muito manuseamento de materiais e muito tempo despendido para estas operações.

De todas as alternativas abordadas neste estudo, o sistema de transportes que melhor se enquadra neste contexto é o sistema de táxi. Com a adoção deste sistema consegue-se uma redução do tempo de ciclo de 126.6min para a situação futura, assim como um sistema muito mais estável com um desvio padrão de 3.7min. Outro sistema muito apelativo é o sistema de revisão periódica com intervalos fixos. Este sistema é o sistema mais fácil de

implementar e consegue muito bons resultados. O sistema de revisão contínua, embora produza melhores resultados do que o sistema de revisão periódica com intervalos fixos, não se mostra como uma opção viável, já que os ganhos são muito poucos para justificar um investimento noutra AGV. Isto pode ser explicado pelas taxas de *empty travel rate* de ambos os métodos. Embora faça mais viagens, a taxa de *empty travel rate* do sistema de revisão contínua é aproximadamente 7% maior que o método de revisão periódica com intervalos fixos. Ou seja, o AGV vai fazer mais viagens mas vai andar mais tempo vazio, o que explica os ganhos tão reduzidos.

Em suma, constata-se que o método atual de transportes não tem capacidade para abranger a procura futura. O método que origina melhores resultados é o método de táxi, ao passo que o método de revisão periódica origina bons resultados com uma implementação mais fácil. O método de revisão contínua é uma opção muito pouco viável para os níveis de produção estudados.

5.4. Desenho fatorial 2^k

Os modelos de simulação geralmente têm muitos parâmetros de entrada, e determinar quais deles têm um impacto significativo nas medidas de performance pode tornar-se uma tarefa complicada (Law., 2017). A determinado momento, a empresa pode deparar-se com uma decisão entre optar por um AGV com mais capacidade ou mais rápido, para dar resposta a um certo nível de procura. Antes de serem feitos desenhos de experiências com todos os parâmetros, é necessário determinar quais os fatores com mais impacto na resposta do modelo e qual a sua interação com o nível de procura. A abordagem mais utilizada para fazer esta análise é chamada de *one-factor-at-a-time* (OFAT), em que é medido o efeito de cada fator fixando os restantes. No entanto, esta estratégia não só é ineficiente em termos de número de simulações necessárias como também parte do pressupostos que não existem interações entre fatores, o que na maioria dos casos não representa a realidade. Uma estratégia mais económica e que permite medir interações entre fatores é chamada de desenho fatorial 2^k . Esta análise requer que se escolham 2 níveis de cada fator para correr simulações para todas as 2^k combinações possíveis entre níveis de fatores. Os fatores e os respetivos níveis em estudo estão representados na Tabela 5.3 (Law., 2017).

Tabela 5.3. Fatores e respectivos níveis do desenho fatorial 2^3

Fator	Nome	Unidades	Nível baixo	Nível alto
A	Procura média	Lotes/dia	41	164
B	Capacidade	Lotes	2	8
C	Velocidade média	m/s	0.55	2.2

A análise realizada para o método de táxi encontra-se representada na Tabela 5.4. A resposta em causa é o tempo médio de transporte dos lotes [min]. As restantes análises encontram-se em anexo.

Tabela 5.4. Desenho fatorial 2^3 para o método de táxi

Combinação de fatores	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Resposta
1	-	-	-	3.3
2	+	-	-	3.8
3	-	+	-	3.3
4	+	+	-	3.8
5	-	-	+	12.9
6	+	-	+	279.7
7	-	+	+	12.8
8	+	+	+	74.4

Após obter as respostas, os efeitos são calculados através da diferença entre a resposta quando o fator está com o nível “+” e a resposta quando o está com o nível “-” Para o fator A o efeito é o resultado da seguinte expressão:

$$e_A = \frac{R_1 + R_3 + R_5 + R_7}{4} - \frac{R_2 + R_4 + R_6 + R_8}{4} \quad (5.2)$$

Para além do efeito dos fatores individuais, é necessário medir a interação entre fatores. Uma métrica dessa interação, denotada por e_{AB} , é a diferença entre a resposta quando os fatores A e B têm o mesmo nível e quando têm níveis diferentes. A interação entre os fatores A e B é dada por:

$$e_{AB} = \frac{R_1 + R_4 + R_5 + R_8}{4} - \frac{R_2 + R_3 + R_6 + R_7}{4} \quad (5.3)$$

Os efeitos resultantes desta análise encontram-se resumidos na Tabela 5.5, para os métodos de transporte de táxi, revisão contínua e revisão periódica. A situação atual não

fez parte do estudo devido aos valores de procura utilizados, aos quais o método atual não dá resposta.

Tabela 5.5. Efeitos da análise fatorial 2^k

<i>Métrica</i>	<i>Revisão Periódica</i>	<i>Revisão Contínua</i>	<i>Táxi</i>
e_A	6885.6	397.7	82.35
e_B	-6919.1	-399.8	-51.35
e_C	5625.4	405.4	91.4
e_{AB}	-6883.1	-396.1	-51.3
e_{AC}	5090.0	383.3	81.9
e_{BC}	-5097.1	-385.5	-51.53

5.4.1. Análise dos resultados

Para todos os métodos de transporte, os fatores A e C têm um efeito positivo. Isto significa que quando um destes fatores passa do seu nível baixo para o nível alto, a resposta aumenta. Por outro lado, quando o fator B passa do seu nível baixo para o seu nível alto, a resposta diminui. Relativamente ao método de táxi, o fator C, velocidade, é o fator com mais efeito, pelo que deve ser a variável a considerar primeiro. No método de revisão contínua, continua a ser o fator C com mais efeito, mas já com pouca diferença dos restantes fatores, ao passo que no método de revisão periódica, o fator com mais impacto é claramente o fator B, capacidade. Destes dados pode afirmar-se que para métodos em geral mais lentos, a capacidade tem um impacto maior no tempo médio de transporte do lote em que, quanto maior a capacidade, menor o tempo de transporte. Por outro lado, em métodos mais rápidos, a velocidade tem um impacto superior à capacidade, em que quanto mais rápido o AGV, menor o tempo médio de transporte dos lotes.

As métricas relativas às interações entre dois fatores têm como objetivo medir como o efeito de uma variável se altera à medida que o nível de outra variável se altera também. Uma interação negativa entre A e B significa que se aumentarmos o nível de A, o principal efeito de B será diminuir a resposta, e vice-versa. Se A e B descerem de nível, a resposta aumenta. Para uma interação positiva, o efeito é o oposto. Nesta análise constata-se que, para o método de táxi, a procura interage mais com a velocidade do que com a

capacidade. O mesmo não pode ser dito para os restantes métodos, em que a procura interage mais com a capacidade. Esta interação tem um efeito negativo, querendo dizer que se a procura aumentar mas for aumentada também a capacidade na mesma proporção, o tempo médio de transporte dos lotes vai diminuir. Relativamente à velocidade, como o efeito da interação com a procura é positivo, significa que uma descida de nível de ambos os fatores resulta numa diminuição da resposta e uma subida resulta num aumento.

5.5. Avaliação do desempenho dos métodos de transporte com diferentes níveis de procura

No decorrer deste estudo foram analisados apenas 2 níveis de procura. Como foi discutido no subcapítulo 5.3, para ambos os níveis o método que obtém melhores resultados é o método de táxi. No entanto, faz todo o sentido avaliar o desempenho dos métodos de transporte para valores superiores de procura, já que é expectável que a partir de certo ponto a performance do método de táxi baixe devido ao consumo elevado de bateria.

O gráfico da Figura 5.14 representa o tempo médio de transporte por lote para diferentes níveis de procura utilizando os métodos de táxi, revisão contínua e revisão periódica. A situação atual não está representada neste gráfico porque já foi verificado que, para o nível médio de procura das próximas 34 semanas (82 lotes/dia), o sistema atual não consegue dar resposta. Naturalmente, também não conseguirá dar resposta a níveis de procura superiores, pelo que foi omitido desta análise.

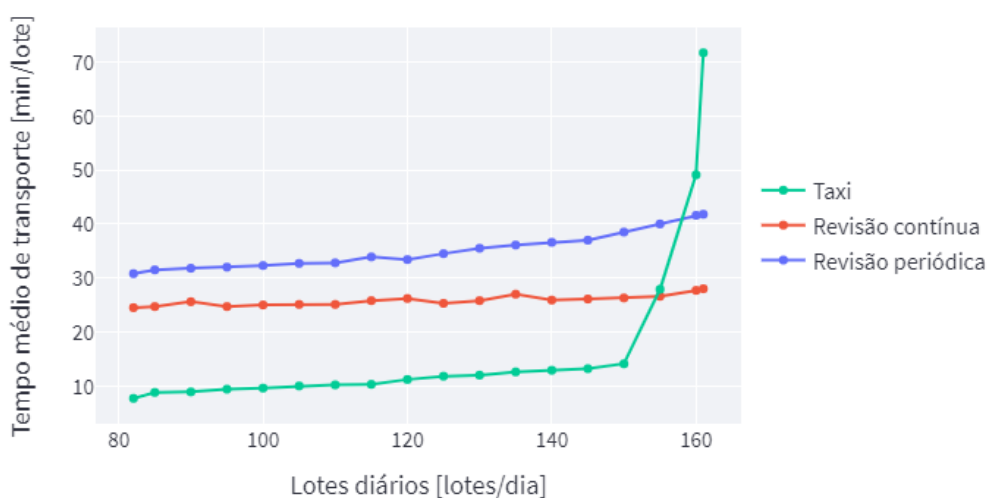


Figura 5.14. Variação do tempo de transporte em função da procura

A partir da Figura 5.14, é possível concluir que o método de táxi é o método com melhores resultados até uma procura média diária de cerca de 155 lotes. A partir desse valor tem um comportamento exponencial, tornando-se inviável a sua aplicação. O método de revisão periódica é o método que origina melhores resultados para níveis de procura superiores a 155 lotes/dia, com apenas 1 AGV. O método de revisão contínua torna-se particularmente apelativo para elevados níveis de procura. O desempenho deste método permaneceu praticamente inalterado para os valores de procura estudados. Daqui é possível extrapolar que este método apenas seria viável no contexto atual da empresa se a produção nas áreas em estudo fosse muito superior à atual, já que este método exige o investimento em outro AGV.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O Sistema de transporte inter-área é um subsistema crítico das fábricas de semicondutores de 300mm. No atual ambiente dinâmico do mercado de semicondutores, o número de transportes entre diferentes áreas no processo de manufatura aumentou, e desenhar sistemas de transporte interno de materiais eficientes tornou-se essencial. Os fluxos reentrantes característicos desta indústria fazem com que os lotes percorram grandes distâncias até completarem as operações de manufatura. Por este motivo, aliado ao elevado peso dos produtos transportados, a automatização dos transportes inter-área nas fábricas de semicondutores é cada vez mais utilizada, com o intuito de reduzir o custo de fabricação e gerar elevadas taxas de utilização dos equipamentos.

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo de simulação que, a partir dos registos produtivos dos primeiros 3 meses do ano e das metas produtivas das próximas 34 semanas, preveja o tempo de transporte dos lotes, as taxas de utilização dos veículos, o *work-in-progress* (WIP) e o *throughput* total entre 3 grandes áreas produtivas.

O sistema atual de transporte utilizado tem como base a lógica de um *mizusumashi*. No entanto, este método mostra ser bastante ineficiente, o que se traduz em elevados tempos de transporte e níveis de WIP elevados. Além disto, devido ao aumento da produção previsto para as próximas 34 semanas, o sistema atual não vai conseguir dar resposta devido ao aumento significativo do tempo médio de transporte e do WIP. Deste modo, tendo por base o modelo de simulação desenvolvido, foi analisado o desempenho de 3 métodos de transporte alternativos, método de revisão periódica com intervalos fixos, método de revisão contínua e método de táxi.

Para os registos produtivos dos primeiros 3 meses, o método de táxi é o que revela ter melhor desempenho. Com a implementação deste método, o tempo médio de transporte baixa de $69.1min$ com um desvio padrão de $39.9min$ para $7.7min$ com um desvio padrão de $3.4min$, ao passo que o WIP reduz de $2.6lotes$ com um desvio padrão de $2lotes$ para $0.8lotes$ com um desvio padrão de $0.8lotes$. Para as metas produtivas das próximas 34 semanas, o modelo prevê um tempo médio de transporte de $134.3min$ com um desvio padrão de $125.7min$ para o sistema atual, e um WIP médio de $8.2lotes$ com $5.4lotes$

de desvio padrão. Para estes níveis de procura, o método de táxi continua a ser o método com melhor desempenho, resultando num tempo médio de transporte de $7.7min$ com um desvio padrão de $3.7min$ e num WIP médio de $0.9lotes$ com $0.9lotes$ de desvio padrão.

Relativamente aos restantes métodos de transporte que têm por base a lógica de um *mizusumashi*, o método de revisão periódica com intervalos fixos mostra-se ser um método bastante eficiente e com a implementação mais simples. Já o método de revisão contínua revela-se inviável para os níveis de procura estudados, já que os resultados obtidos não compensam o investimento necessário para a aplicação do método. No entanto, se a procura aumentar a níveis superiores a 155 lotes diários, o método de táxi já não consegue dar resposta, pelo que os restantes métodos se tornam bastante apelativos. Conclui-se deste estudo que a aplicação de um sistema de transporte *mizusumashi* apenas é justificada para fluxos de transporte significativos e uniformemente distribuídos pelos diferentes pontos de recolha, caso contrário, um método de transporte como o método de táxi, que segue uma lógica FIFO, desempenha a função de forma mais eficiente.

Como tal, conclui-se que o método de táxi apresentado tem grande potencial para ser implementado na empresa, dando uma boa resposta ao aumento de produção que se vai verificar nas próximas semanas. Relativamente a trabalhos futuros, é necessário estudar a automatização do sistema *mizusumashi* manual e das novas rotas que vão surgir com a expansão das áreas de trabalho no chão de fábrica. A aplicação desenvolvida a partir do modelo de simulação está preparada para suportar novas áreas de interesse, de maneira que, com a aplicação de um modelo matemático para o cálculo do número de AGVs necessários, o modelo prevê o desempenho que teria um sistema de transportes inter-área totalmente automatizado.

Este estudo foi inteiramente direcionado para os transportes inter-área. No entanto, devido ao elevado fluxo de transportes característico da indústria de semicondutores, há imensos transportes de pequena distância intra-área. Outro trabalho futuro passa por estudar a implementação de um sistema *overhead hoist transport* (OHT), responsável por reduzir o esforço resultante dos pequenos movimentos intra-área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

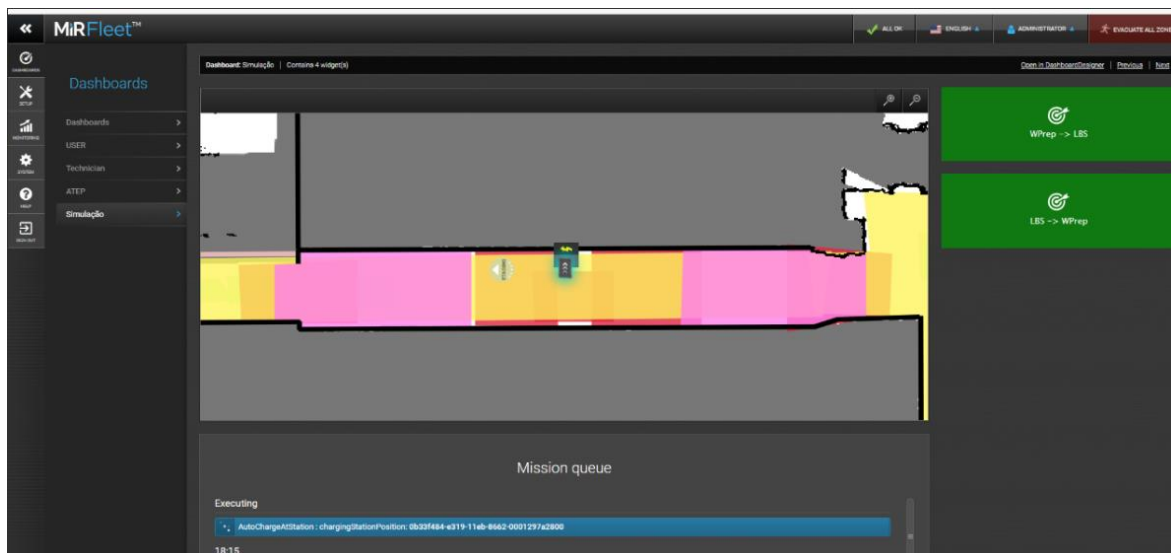
- Agrawal, G. K., & Heragu, S. S. (2006). A survey of automated material handling systems in 300-mm semiconductor fabs. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 19(1), 112–120. <https://doi.org/10.1109/TSM.2005.863217>
- Beamon, B.M. (1998). Performance, reliability, and performability of material handling systems. *International Journal of Production Research*, 36(2), pp.377–393.
- Beamon, B.M. (1999). System reliability and congestion in a material handling system. *Computers & Industrial Engineering*, 36(3), pp.673–684.
- D. Wiese & C. Roser (2016). *Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World (Vol. 488)*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7>
- Dukić, G., Opetuk, T., Cajner, H. and Jakovljević, M. (2018). Simulation analysis of models for estimation of empty travel time of vehicles in non-automated material handling systems. *FME Transaction*, 46(3), pp.336–341.
- Fowler, J. W., Mönch, L., & Ponsignon, T. (2015). DISCRETE-EVENT SIMULATION FOR SEMICONDUCTOR WAFER FABRICATION FACILITIES: A TUTORIAL. In *International Journal of Industrial Engineering (Vol. 22, Issue 5)*.
- Gil Vilda, F., Yagüe-Fabra, J. A., & Sunyer Torrents, A. (2020). An in-plant milk-run design method for improving surface occupation and optimizing mizusumashi work time. *CIRP Annals*, 69(1), 405–408. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.03.012>
- Gotthardt, S., Hulla, M., Eder, M., Karre, H., & Ramsauer, C. (2019). Digitalized milk-run system for a learning factory assembly line. *Procedia Manufacturing*, 31, 175–179. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.028>
- Harris, C., Harris, R & Streeter, C. (2011), “Lean Supplier Development: Establishing Partnerships and True Costs Throughout the Supply Chain”, CRC Press.
- J. Zhang, W. Qin & L.H. Wu (2015): A performance analytical model of automated material handling system for semiconductor wafer fabrication system, *International Journal of Production Research*, DOI:10.1080/00207543.2015.1047980
- Johnson, M.E. and Brandeau, M.L. (1999). Design of an Automated Shop Floor Material Handling System with Inventory Considerations. *Operations Research*, 47(1), pp.65–80.
- Klenk, E., & Galka, S. (2019). Analysis of real-time tour building and scheduling strategies for in-plant milk-run systems with volatile transportation demand. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2110–2115. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.517>

- Law, A. M. (2017). A Tutorial on Design of Experiments for Simulation Modeling - WSC : 2017 Winter Simulation Conference : 3-6 December 2017.
- Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis, FIFTH EDITION*. www.averill-law.com
- Loyd, N., Harris, G., Gholston, S., & Berkowitz, D. (2020). Development of a lean assessment tool and measuring the effect of culture from employee perception. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(7), 1439–1456. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0375>
- Manda, B.S. and Palekar, U.S. (1997). Recent Advances in the Design and Analysis of Material Handling Systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119(4B), pp.841–848.
- Na, B., Woo, J. E., & Lee, J. (2016). Lifter assignment problem for inter-line transfers in semiconductor manufacturing facilities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5–8), 1615–1626. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8327-0>
- Nomura, J., & Takakuwa, S. (2006). Optimization of a number of containers for assembly lines: The fixed-course pick-up system. *International Journal of Simulation Modelling*, 5(4), 155–166. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM05\(4\)3.066](https://doi.org/10.2507/IJSIMM05(4)3.066)
- Ohno, T., & Bodek, N. (2019). Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. In *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9780429273018>
- Parker, A., Heflin, A., & Jones, L. C. (2021). Analyzing University of Virginia Health publications using open data, Python, and Streamlit. *Journal of the Medical Library Association : JMLA*, 109(4), 688–689. <https://doi.org/10.5195/jmla.2021.1360>
- Perrone, L. F., Wieland, F. P., Liu, J., Lawson, B. G., Nicol, D. M., Fujimoto, R. M., & Castillo, V. (2006). *PARALLEL SIMULATIONS OF MANUFACTURING PROCESSING USING SIMPY, A PYTHON-BASED DISCRETE EVENT SIMULATION TOOL*.
- Peters, B. A., & Yang, T. (1997). Integrated Facility Layout and Material Handling System Design in Semiconductor Fabrication Facilities. In *IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING* (Vol. 10, Issue 3).
- Pierce, G. Neal., & Stafford, R. (1994). Modelling and simulation of material handling for semiconductor wafer fabrication. *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference*, 900-905.
- Rene, P., & Domingo, T. (n.d.). Identifying and Eliminating The Seven Wastes or Muda What is Waste? www.rtdonline.com
- Romero, D., Gaiardelli, P., Thürer, M., Powell, D., & Wuest, T. (n.d.). Cyber-Physical Waste Identification and Elimination Strategies in the Digital Lean Manufacturing World.

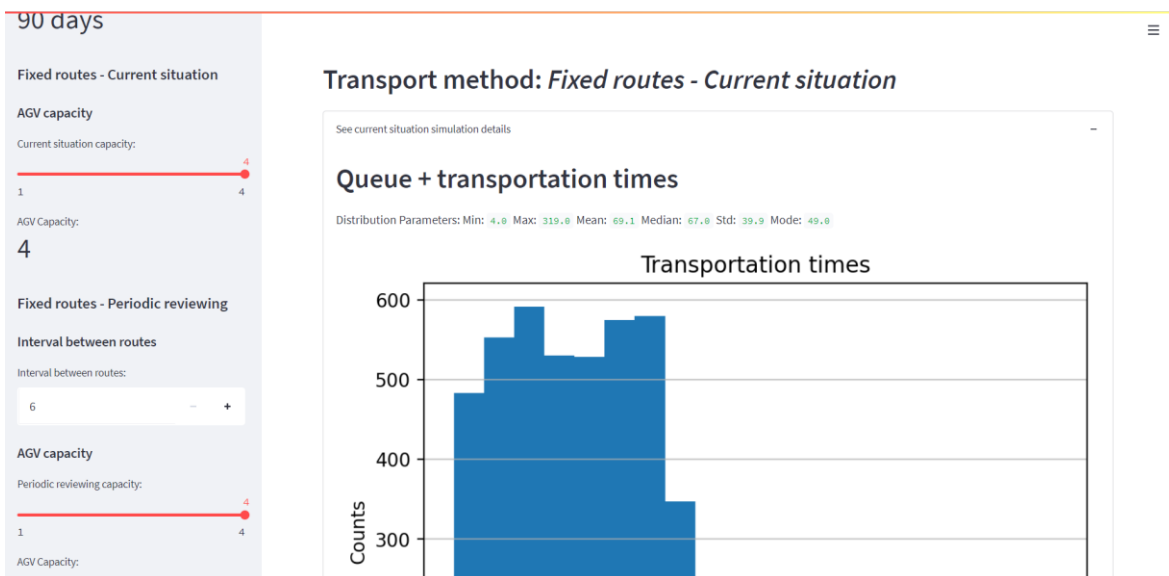
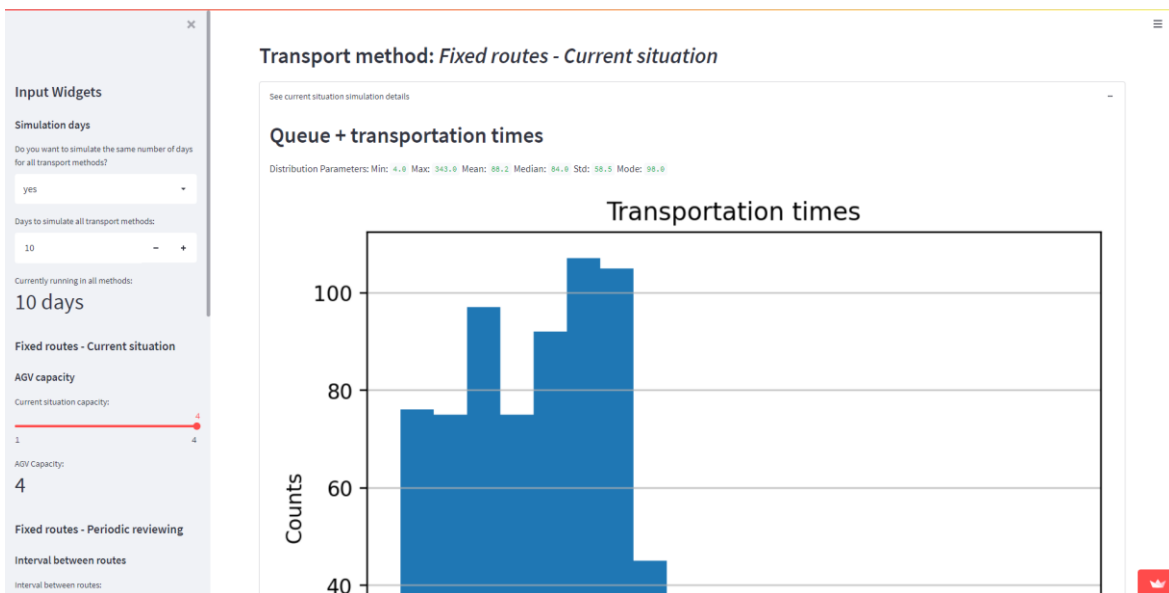
-
- Roser, C., & Nakano, M. (2015). Guidelines for the selection of FIFO lanes and supermarkets for kanban-based pull systems - When to use a FIFO and when to use a supermarket. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 460, 282–289. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7_33
- Shukla, S., Maheshwari, A., & Johri, P. (2021). Comparative Analysis of MI Algorithms & Stream Lit Web Application. *Proceedings - 2021 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking, ICAC3N 2021*, 175–180. <https://doi.org/10.1109/ICAC3N53548.2021.9725496>
- Suh, Y. J., & Choi, J. Y. (2021). Efficient Fab facility layout with spine structure using genetic algorithm under various material-handling considerations. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1904159>
- Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & Uchikawa, S. (1977). Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*, 15(6), 553–564. <https://doi.org/10.1080/00207547708943149>
- Sujono, S. and Lashkari, R.S. (2007). A multi-objective model of operation allocation and material handling system selection in FMS design. *International Journal of Production Economics*, 105(1), pp.116–133.
- Sutherland, J. (2007). The Seven Deadly Wastes of Logistics: Applying Toyota Production System Principles to Create Logistics Value. www.lehigh.edu/~inchain
- Thun, J. H., Drüke, M., & Grubner, A. (2010). Empowering Kanban through TPS-principles - An empirical analysis of the Toyota Production System. *International Journal of Production Research*, 48(23), 7089–7106. <https://doi.org/10.1080/00207540903436695>
- Uzsoy, R., Lee, C. Y., & Martin-Vega, L. A. (1994). A review of production planning and scheduling models in the semiconductor industry part h: Shop-floor control. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 26(5), 44–55. <https://doi.org/10.1080/07408179408966627>
- Vijayaram, TR. (2006). Materials handling technology and significance of expert systems to select appropriate handling equipments in engineering industries: A review. *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 65, August 2006, pp. 619-624.
- W. K. V. Chan, A. D’Ambrogio, G. Zacharewicz, N. Mustafee, G. Wainer & E. Page (2017). Module-based modeling and analysis of just-in-time production adopting dual-card kanban system and mizusumashi worker. 2017 Winter Simulation Conference (WSC).IEEE.
- Ward, S. C. (1989). Arguments for Constructively Simple Models. In *Source: The Journal of the Operational Research Society* (Vol. 40, Issue 2). <https://about.jstor.org/terms>

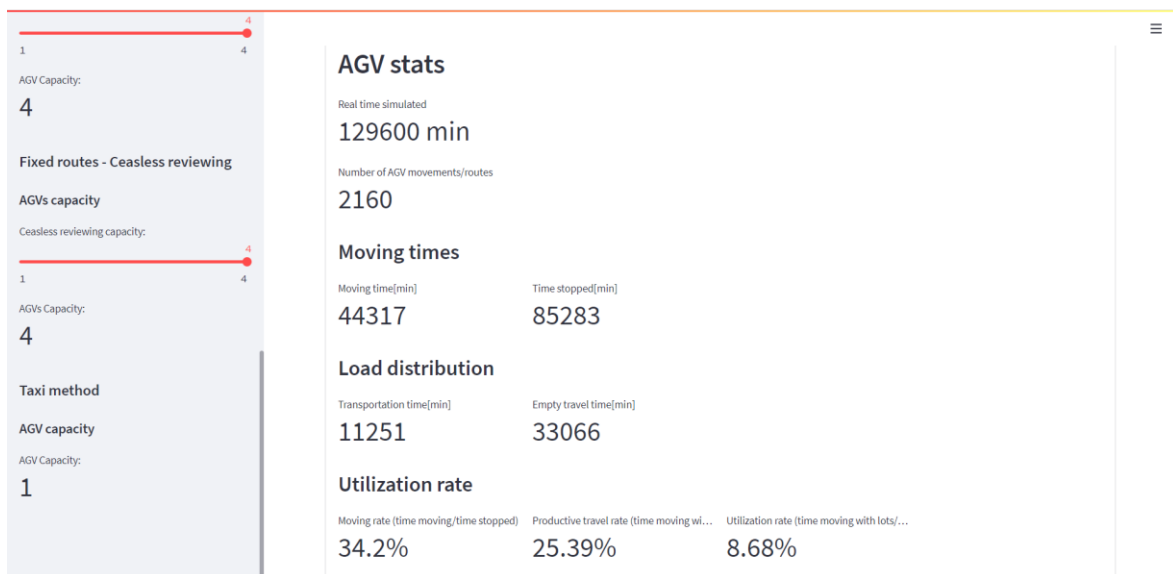
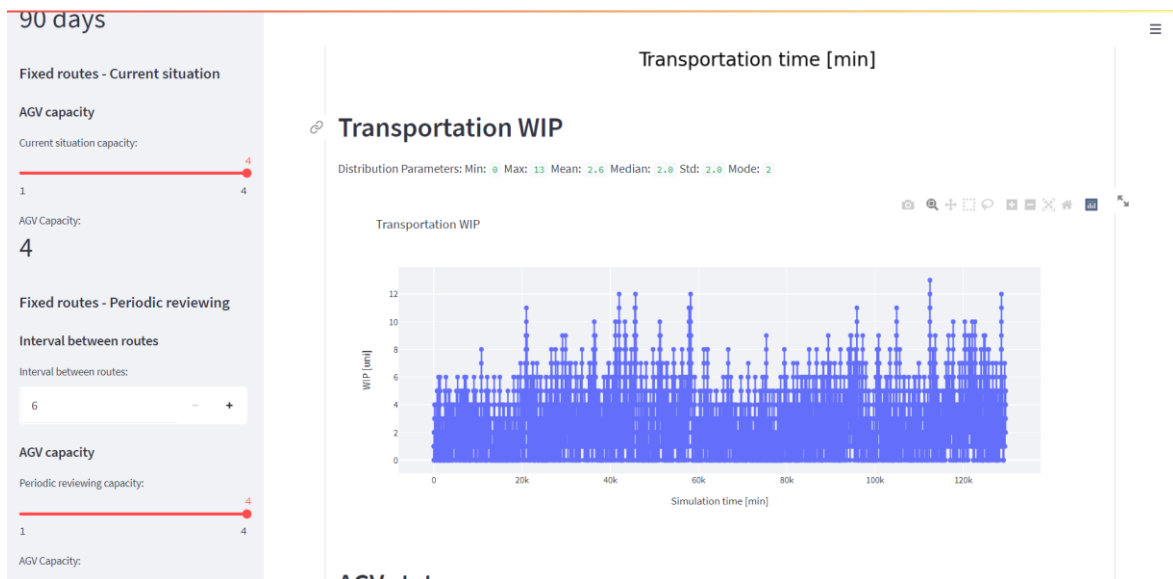
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (1997). Lean thinking—banish waste and create wealth in your corporation. In *Journal of the Operational Research Society* (Vol. 48, Issue 11, p. 1148). <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600967>
- Wu, L., Wang, J., & Zhang, J. (2011). AISC 123 - Performance Analytical Model for Interbay Material Handling System with Shortcut and Blocking. In *AISC* (Vol. 123).
- Zhou, Z., & Rose, O. (2012). Wip control and calibration in a wafer fab. *Proceedings - Winter Simulation Conference*. <https://doi.org/10.1109/WSC.2012.6464988>

ANEXO A



ANEXO B





ANEXO C

Fator	Nome	Unidades	Nível baixo	Nível alto
A	Procura média	Lotes/dia	41	164
B	Capacidade	Lotes	2	8
C	Velocidade média	m/s	0.55	2.2

COMBINAÇÃO DE FATORES	FATOR 1	FATOR 2	FATOR 3	RESPOSTA
1	-	-	-	17.7
2	+	-	-	45.6
3	-	+	-	16.9
4	+	+	-	17.8
5	-	-	+	42.7
6	+	-	+	1602.4
7	-	+	+	36.1
8	+	+	+	38.5

ANEXO D

Fator	Nome	Unidades	Nível baixo	Nível alto
A	Procura média	Lotes/dia	41	164
B	Capacidade	Lotes	2	8
C	Velocidade média	m/s	0.55	2.2

COMBINAÇÃO DE FATORES	FATOR 1	FATOR 2	FATOR 3	RESPOSTA
1	-	-	-	22.5
2	+	-	-	3613.1
3	-	+	-	20.8
4	+	+	-	21.8
5	-	-	+	66.9
6	+	-	+	24013.6
7	-	+	+	47.6
8	+	+	+	51.6