



# IMPACTO DA PHYSICAL INTERNET NO CONTAINER LOADING PROBLEM

**JOÃO PEDRO COUTO SILVA**

outubro de 2020

## **IMPACTO DA PHYSICAL INTERNET NO CONTAINER**

### **LOADING PROBLEM**

João Pedro Couto Silva  
1101533

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





## **IMPACTO DA PHYSICAL INTERNET NO CONTAINER**

### **LOADING PROBLEM**

João Pedro Couto Silva  
1101533

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Engenheiro António Galvão Ramos.

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Especialista José Carlos Sá

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Doutor António Galvão Ramos

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

Doutora Elsa Marília Silva

Investigadora, INESC TEC



## AGRADECIMENTOS

Para a realização deste estudo foi necessário empenho, dedicação, momentos de reflexão, avanços e recuos. Contudo, nada disso seria possível sem o apoio de várias pessoas.

Assim sendo, gostaria de agradecer à minha família, namorada e amigos, que nunca desistiram de mim, pois estiveram lá para me apoiar, incentivar e dar força para a conclusão desta etapa.

Também queria agradecer, sobretudo, ao Professor Engenheiro António Galvão Ramos, por toda a paciência, disponibilidade e partilha de conhecimentos ao longo deste projeto.

Acrescente-se, ainda, o meu agradecimento a todos aqueles que não foram referidos e que de alguma forma possam ter contribuído para a concretização deste documento.

A todos, muito obrigado!



## PALAVRAS CHAVE

Logística, *Physical Internet*; *Container loading problem*.

## RESUMO

O processo logístico, como o conhecemos atualmente, apresenta algumas limitações, pois tem-se revelado ineficiente e insustentável.

Efetivamente, a inexistência de partilha de recursos e a dificuldade de implementar melhorias, tornam o serviço deficitário. Como exemplo desta ineficiência, verifica-se que, a quantidade de viagens efetuadas sem ou com pequenas cargas representam uma percentagem significativa das viagens efetuadas.

Partindo deste paradigma surgiu um novo modelo logístico, a *Physical Internet* (PI). Este modelo pressupõe a utilização de uma rede logística global aberta, que permita a partilha de informação e de meios. A PI utiliza caixas modulares padronizadas, que são a base da transformação logística.

Assim sendo, com este trabalho analisou-se a eficiência de uma das componentes da PI, nomeadamente o impacto que as caixas modulares padronizadas poderão ter nos problemas de carga de camiões, conhecidos na literatura como "*container loading problem*" (CLP).

Este trabalho permitiu verificar que os tempos de processamento dos problemas logísticos, recorrendo à utilização das caixas da PI, é significativamente inferior. Principalmente à medida que o volume ocupado pelas caixas é mais próximo do volume do contentor.



**KEYWORDS**

*Logistics, Physical Internet; Container loading problem.*

**ABSTRACT**

*Logistics, as we know it today, has shown some limitations, as it proven to be inefficient and unsustainable.*

*Actually, there's a lack of resource sharing and a struggle to implement changes that make it deficient. As an example, there is a significant part of the trips that are made with empty or almost empty loads.*

*With this paradigm in mind, a new model emerged, the Physical Internet (PI). This model uses an open global logistics network that allows that information and resources could be shared. PI uses standard modular boxes that are the key for the logistics change.*

*This work looks at the efficiency of one part of the PI, in particular, the influence of standard modular boxes in the Container Loading Problem (CLP).*

*Whit this work it was possible to prove that the processing time of the problems using the PI is significantly shorter. Especially when the volume occupied by the boxes comes close to the container volume.*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

BPP	Bin Packing Problem
CLP	Container Loading Problem
CO2	Dióxido de carbono
D	Profundidade
EUA	Estados Unidos da América
FLB	Ponto frontal-esquerdo-inferior
H	Altura
KLP	Knapsack Loading Problem
MCLP	Multi-Container Loading Problem
MIP	Mixed Integer linear Programing
PI	Physical Internet
SPP	Strip Packing Problem
VC70	Volume ocupado pelas caixas de 70%
VC80	Volume ocupado pelas caixas de 80%
VC90	Volume ocupado pelas caixas de 90%
W	Largura

### Lista de Unidades

%	Porcentagem
m	Metro
mm	Milímetro
s	Segundo

### Lista de Símbolos

$\pi$	Letra Grega, a sua leitura pi, é a abreviatura Physical Internet PI
$\forall$	Qualquer que seja



## GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Container Loading Problem</i>	Problemas de Enchimento de Contentores
<i>Cowboys</i>	Vaqueiro
<i>hub-n-spoke</i>	Rede logística com um centro e um raio de distribuição definido
<i>Identical item packing problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Master bill of lading</i>	Lista contendo toda a informação de diversas remessas
<i>M-Box</i>	Caixa desenvolvida no projeto Modulushca
<i>Modulushca</i>	Projeto de investigação e desenvolvimento da PI
<i>Physical Internet</i>	Conceito Logístico
<i>Multiple bin-size bin packing problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Multiple heterogeneous knapsack problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Multiple heterogeneous large object placement problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Multiple identical knapsack problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Multiple identical large object placement problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Multiple stock-size cutting stock problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>NP-Hard</i>	Da teoria da complexidade computacional, problemas de dificuldade elevada
<i>Residual bin packing problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Residual cutting stock problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Single bin-size bin packing problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Single knapsack problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Single large object placement problem</i>	Variante dos problemas de CLP
<i>Single stock-size cutting stock</i>	Variante dos problemas de CLP

---

<i>problem</i>	
<i>software</i>	Software, programa informático
<i>stocks</i>	Produto armazenado
<i>This way up</i>	Este lado para cima
<i><math>\pi</math>-bridge</i>	Elementos que fazem a transferência de caixas entre movimentadores da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-carriers</i>	Veículos de transporte dependentes da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-composer</i>	Elemento de composição de <i><math>\pi</math>-containers</i> , através de outros de menores dimensões, da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-containers</i>	Caixas desenvolvidas da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-conveyors</i>	Tapetes transportadores da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-gateway</i>	Elemento de comunicação com outras redes logísticas que não a metodologia PI
<i><math>\pi</math>-handlers</i>	Manuseadores da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-hub</i>	Elemento que transfere <i><math>\pi</math>-containers</i> de <i><math>\pi</math>-movers</i> entrada para <i><math>\pi</math>-movers</i> de saída na metodologia PI
<i><math>\pi</math>-lift-trucks</i>	Empilhador da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-movers</i>	Elementos de movimentação da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-nodes</i>	Nós ou centros de comunicação logística da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-sorter</i>	Elemento de receção e encaminhamento das caixas da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-store</i>	Armazém da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-switch</i>	Elementos que fazem a transferência de caixas entre movimentadores da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-transit</i>	Elementos de receção de caixas da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-transporters</i>	Elementos de transporte da metodologia PI
<i><math>\pi</math>-vehicles</i>	Veículos de transporte independentes da metodologia PI

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DAS LIGAÇÕES DE UMA CIDADE (CRAINIC & MONTREUIL, 2016)	8
FIGURA 2 - ILUSTRAÇÃO DA MODULARIDADE DOS $\pi$ -CONTAINER (BENOIT MONTREUIL, 2011)	15
FIGURA 3 - ELEMENTOS CHAVE DA PI (BENOIT MONTREUIL ET AL., 2010)	16
FIGURA 4 - TRANSPORTE DEDICADO E HIPER-CONECTADO (CRAINIC & MONTREUIL, 2016)	20
FIGURA 5 - PLATAFORMA MODULAR PARA AS M-BOX (LANDSCHÜTZER ET AL., 2015)	23
FIGURA 6 - DIMENSÕES PROPOSTAS PARA M-BOX (LANDSCHÜTZER ET AL., 2015)	24
FIGURA 7 - DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS (CHEN ET AL., 1995)	35
FIGURA 8 - MODELAÇÃO COM PI COM 20 CAIXAS, VC70 E 2 CAIXAS DIFERENTES	50
FIGURA 9 - MODELAÇÃO SEM PI COM 20 CAIXAS, VC70 E 2 CAIXAS DIFERENTES	50
FIGURA 10 - MODELAÇÃO COM PI COM 30 CAIXAS, VC80 E 3 CAIXAS DIFERENTES	51



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – VARIÁVEIS DO PROBLEMA	34
TABELA 2 – CAIXAS SEM METODOLOGIA PI ( <i>PLASTIC CONTAINERS AND PALLETS</i> , N.D.)	38
TABELA 3 – CAIXAS DESENVOLVIDAS PELA PI (LANDSCHÜTZER ET AL., 2015)	39
TABELA 4 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO SEM PI, COM 2 CAIXAS DIFERENTES	41
TABELA 5 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO SEM PI, COM 3 CAIXAS DIFERENTES	42
TABELA 6 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO SEM PI, COM 4 CAIXAS DIFERENTES	42
TABELA 7 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO PI, COM 2 CAIXAS DIFERENTES	42
TABELA 8 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO COM PI, COM 3 CAIXAS DIFERENTES	43
TABELA 9 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO COM PI, COM 4 CAIXAS DIFERENTES	43
TABELA 10 – COMPARAÇÃO TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO 2 CAIXAS VC70	44
TABELA 11 – COMPARAÇÃO TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO 2 CAIXAS VC80	44
TABELA 12 – COMPARAÇÃO TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO 2 CAIXAS VC90	45
TABELA 13 – COMPARAÇÃO TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO 3 CAIXAS VC70	45
TABELA 14 – COMPARAÇÃO TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO 3 CAIXAS VC80	45
TABELA 15 – COMPARAÇÃO TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO 3 CAIXAS VC90	46
TABELA 16 – COMPARAÇÃO TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO 4 CAIXAS VC70	46
TABELA 17 – COMPARAÇÃO TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO 4 CAIXAS VC80	46
TABELA 18 – COMPARAÇÃO TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO 4 CAIXAS VC90	47
TABELA 19 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO USANDO PI E VC70	47
TABELA 20 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO USANDO PI E VC80	48
TABELA 21 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO USANDO PI E VC90	48
TABELA 22 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO SEM PI E VC70	48
TABELA 23 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO SEM PI E VC80	49
TABELA 24 – TEMPOS DE OTIMIZAÇÃO SEM PI E VC90	49



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Contextualização .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Organização do relatório.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Redes transporte sem recurso à PI .....	7
2.2	Physical Internet.....	9
2.2.1	Argumentos para o surgimento da PI.....	9
2.2.2	Conceito da PI.....	12
2.2.3	Estrutura física da PI.....	14
2.2.4	Redes de transporte usando a PI.....	19
2.2.5	As <i>M-Box</i> do projeto <i>Modulushca</i> .....	22
2.3	Container loading problem .....	25
3	DESENVOLVIMENTO .....	33
3.1	Descrição do problema .....	33
3.2	Análise de resultados .....	41
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	55
4.1	CONCLUSÕES.....	55
4.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	56
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	59
6	ANEXOS.....	63
6.1	ANEXO1 .....	63
6.2	ANEXO2 .....	71

---

6.3	ANEXO3 .....	76
6.4	ANEXO4 .....	84
6.5	ANEXO5 .....	89
6.6	ANEXO6 .....	97

# INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização do relatório



# 1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação intitulada por *Impacto da Physical Internet no Container Loading Problem* realizou-se no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica – Gestão Industrial, no Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Efetivamente, a escolha do tema deveu-se ao interesse pelo mesmo e ao facto de ter constatado a existência de problemas relacionados com o transporte de mercadorias após o início do contacto com o mundo laboral. Daí colocou-se a questão “Será possível otimizar as redes de transportes, de forma a beneficiar todas as entidades envolvidas no processo?”.

Portanto, neste estudo procurar-se-á verificar a influência da *Physical Internet*, ou seja, as vantagens e desvantagens da sua aplicação e utilidade.

Assim sendo, neste primeiro capítulo será feita uma contextualização do tema, depois definir-se-ão os objetivos deste estudo e indicar-se-á como está organizado o documento.

## 1.1 Contextualização

De acordo com Heskett (1997) em (B. Montreuil et al., 2012), as redes logísticas são, em grande parte, fragmentadas, cada uma dedicada especificamente a uma organização/função, como por exemplo fabricantes de automóveis, retalhistas, correios, entre outros. Ao nível do transporte, os meios usam as mesmas infraestruturas, mas com redes de distribuição específicas.

Segundo (Crainic & Montreuil, 2016), o transporte é dominado pelo transporte de carga completa entre origem-destino, pelo transporte de cargas parciais de redes com centros de distribuição e pelo transporte de pequenas cargas por meios de distribuição específica.

De acordo com os mesmos autores, a introdução de uma rede logística permite mudar para um transporte mais conectado e distribuído, desmultiplicando as viagens origem-destino para múltiplas viagens entre centros de distribuição, com setores adaptados dinamicamente ao modo, meio e negócio mais apropriados. No que diz respeito à distribuição, permite que as empresas coloquem os seus *stocks* em múltiplos armazéns e centros de distribuição nas imediações dos mercados, permitindo entregas rápidas aos clientes em detrimento de os restringir a entregas por meios próprios ou centros dedicados.

Neste sentido, Montreuil (2011) (em (Meller et al., 2012)), apresentou a *Physical Internet* (PI) como uma resposta ao que ele denominou de “*Global Logistics Sustainability Grand Challenge*” (grande desafio da sustentabilidade logística global). Este desafio abordou três aspetos da sustentabilidade, nomeadamente: económico, ambiental e social, utilizando os indícios do sistema de logística atual como evidência da insustentabilidade do sistema.

Ao longo deste texto será feita uma abordagem ao conceito da PI, e testada uma parte da sua aplicabilidade.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é compreender e avaliar a influência que o conceito da PI poderá ter na resolução de problemas de carregamento de camiões, conhecidos na literatura como *container loading problem* (CLP).

Será efetuado um estudo comparativo, usando o programa de otimização “*IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.10.0*”, de um modelo matemático de CLP, por um lado usando as características da logística tradicional e por outro as da PI. Serão analisados os tempos de otimização, o volume ocupado e o número de caixas alocadas.

Em função dos resultados obtidos poderá verificar-se se a PI terá ou não um impacto significativo nos problemas de CLP.

### 1.3 Organização do relatório

O presente documento está dividido em 4 capítulos. No capítulo 1 será realizada uma breve abordagem ao tema, bem como aos objetivos e à organização do presente relatório.

No capítulo seguinte, 2, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos em estudo, será feita uma análise da realidade atual do meio operacional logístico, bem como a definição do objeto de estudo.

No capítulo 3, é feita a descrição do problema a tratar, bem como descrito o modelo matemático utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, no último capítulo, o 4, serão apresentadas as principais conclusões e a perspectiva dos futuros desenvolvimentos.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Redes transporte sem recurso à PI

2.2 Physical Internet

2.2.1 Argumentos para o surgimento da PI

2.2.2 Conceito da PI

2.2.3 Estrutura física da PI

2.2.4 Redes de transporte usando a PI

2.2.5 As *M-Box* do projeto *Modulushca*

2.3 Container loading problem



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordada a pesquisa bibliográfica efetuada para o desenvolvimento desta dissertação.

Tendo por base os requisitos propostos, foi desenvolvida uma pesquisa em artigos científicos, projetos e teses subordinadas aos temas da *physical internet* e do *container loading problem*.

### 2.1 Redes transporte sem recurso à PI

Para (Hakimi et al., 2012) simular o modo atual de envio produtos envolve fabricantes a operar em diversas fábricas/armazéns e produtos expedidos em resposta a encomendas de consumidores/retalhistas. Os produtos são normalmente colocados e embalados em paletes e os carregamentos são atribuídos a camiões, que fazem o transporte desde a carga do fornecedor até ao cliente. Geralmente não existe a partilha de carga entre múltiplos fornecedores, assim como as cargas de produto acabado também são feitas de apenas de uma única origem.

As companhias logísticas e de transporte não só são responsáveis pelo fornecimento de matérias-primas e bens, como também são cruciais no que diz respeito à montagem, armazenamento e na entrega do produto final ao mercado. A logística conecta pessoas com os mercados através de uma rede física. Possibilita a distribuição global das últimas tendências do mercado numa janela temporal precisa, assim como possibilita o transporte especializado de vacinas e medicamentos essenciais em hospitais de campo, em locais remotos. (Ceniga & Sukalova, 2015)

Os produtos encomendados são normalmente preparados em caixas, que são posteriormente empilhadas em paletes. As paletes para o mesmo destino são

combinadas numa remessa. No transporte rodoviário, a carga de um camião é construída a partir de um conjunto de remessas combinadas numa *Master Bill Of Lading* (lista contendo toda a informação as diversas remessas) e são carregadas no camião, respeitando as restrições de peso e volume, garantindo a entrega direta ao destino. (Hakimi et al., 2012)

A figura 1 tenta demonstrar o funcionamento de uma rede logística tradicional de uma cidade com dois centros. A densidade das redes de acessos varia consoante o tipo de cidade, o país e a vizinhança. As atividades de logística e transporte podem ser decompostas em duas grandes categorias, transporte e distribuição. O primeiro refere-se à importação, movimentação e exportação de bens nas cidades, e o segundo refere-se ao armazenamento dinâmico dos bens em diversos armazéns nos meios urbanos. (Crainic & Montreuil, 2016)

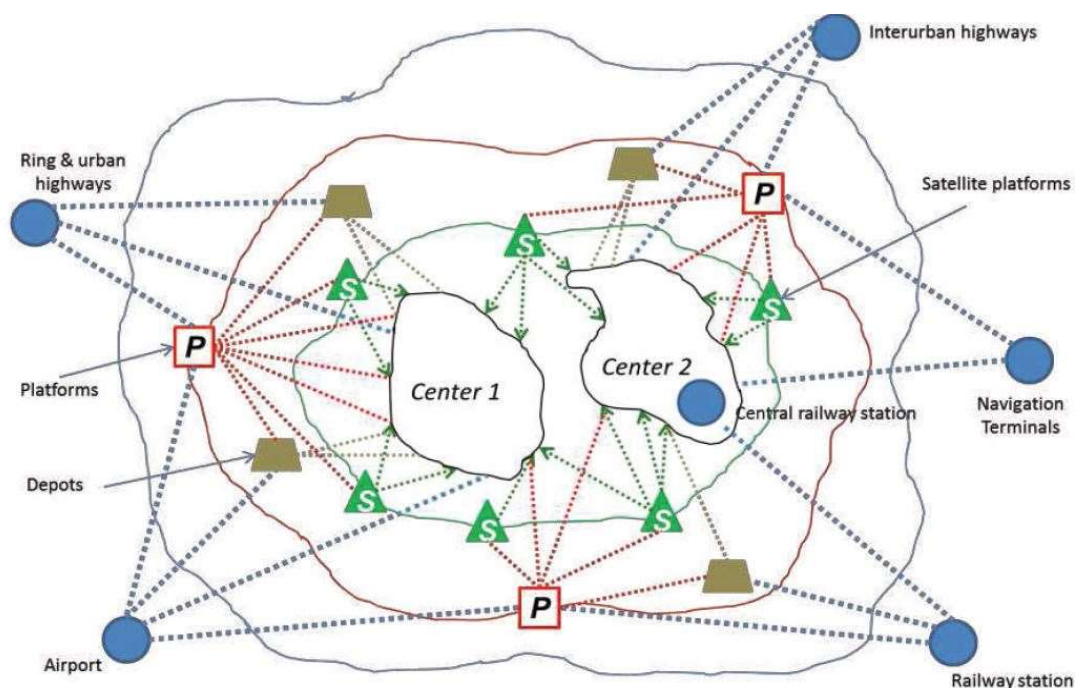


Figura 1 - Representação das ligações de uma cidade (Crainic & Montreuil, 2016)

A desconexão das redes logísticas resulta num número elevado de cruzamentos de operações logísticas, que causam conflitos em termos de eficiência e serviço. (B. Montreuil et al., 2012)

## 2.2 Physical Internet

Nesta secção é apresentado o conceito da PI, o primeiro subcapítulo explica os argumentos para o surgimento desta metodologia, nos capítulos subsequentes são explicados o seu conceito e a sua estrutura física. O último capítulo desta secção apresenta um projeto pioneiro, onde são desenvolvidos elementos físicos da PI, que mais tarde serão utilizados no capítulo do desenvolvimento.

### 2.2.1 Argumentos para o surgimento da PI

A forma como os objetos são movimentados, manuseados, armazenados, executados, fornecidos e usados em todo o mundo não é sustentável, do ponto de vista económico, ambiental e social. Frequentemente, contentores e camiões estão vazios quer à partida quer à chegada. Os veículos carregados vão ficando vazios de ponto de descarga em ponto de descarga à medida que percorrem a sua rota. Os produtos são armazenados em redes de armazéns e de centros de distribuição e não estão disponíveis, rapidamente, com baixos custos de transporte nem onde são necessários. (Benoit Montreuil et al., 2012)

Em (Benoit Montreuil, 2011) são expostos treze motivos que sustentam surgimento da Physical Internet (PI) argumentando-os individualmente:

1. Estamos a embalar e transportar ar;

Segundo estatísticas oficiais, nos Estados Unidos da América (EUA) os camiões circulam apenas com uma taxa de ocupação de aproximadamente 60%. Estima-se que eficácia geral do transporte seja abaixo dos 10%.

2. Transportes de carga vazia são uma norma em vez de uma exceção;

No Reino Unido em 2004 a relação camiões e quilómetros percorridos em vazio era de 27%. Em 2009, nos EUA, cerca de 20% dos camiões relacionados com meios industriais circulavam vazios, e muitos mais quase vazios.

3. Camionistas tornaram-se nos *cowboys* modernos;

Os transportes rodoviários dominam o transporte continental, o que significa uma elevada procura de camionistas. O modo de transporte obriga a que os camionistas estejam sempre em viagem, frequentemente longe de casa por elevados períodos. Daí que a sua vida familiar, social e até a sua saúde sejam precárias. Um estudo do conselho nacional de segurança no transporte norte-americano constatou que, 58% dos acidentes relatados pelos motoristas foram considerados como fadiga e privação de sono.

4. A maioria dos produtos ficam parados e armazenados onde não são necessários, contudo muito frequentemente não são disponibilizados rapidamente onde são necessários;

Fabricantes, distribuidores, retalhistas e utilizadores, normalmente, armazenam produtos em grande escala nas suas redes de armazéns e centros de distribuição, no entanto os níveis de serviço e o tempo de resposta são limitados e duvidosos.

5. Instalações fabris e armazenamento não são utilizadas corretamente;

A maioria das empresas investem em armazéns e/ou instalações fabris que são pouco usadas na maioria do tempo ou durante algumas partes do ano ou ainda, usadas erradamente para manusear e trabalhar em materiais que deveriam ser trabalhados noutros locais, provocando muitas movimentações desnecessárias.

6. Muitos produtos nunca são vendidos ou usados;

Uma parte significativa dos produtos nunca atingem o mercado na altura certa, resultando em produto não vendido ou não usado em algum armazém, quando poderiam ter sido usados noutros locais.

7. Os produtos não alcançam quem mais necessita deles;

Quando os bens são transportados de um país desenvolvido para um país menos desenvolvido, as infraestruturas, capacidades e níveis de serviço decrescem significativamente, sendo difícil, caro e demorado alcançar quem necessita dos bens. Isto ocorre também em zonas atingidas por catástrofes e com crises elevadas.

8. Transporte intermodal rápido e fiável ainda é um sonho ou uma piada;

Embora existam alguns exemplos intermodais excelentes, especialmente associados ao transporte e logística de contentores, de modo geral, a sincronização é tão fraca e tão mal projetada que as rotas intermodais são, na maioria das vezes, arriscadas e ineficientes, quer em termos de tempo quer em termos custo. Isto é agravado pelo fato de que os meios de transporte com menor eficiência energética são os mais utilizados. Por exemplo, os camiões são muito mais usados que os comboios, quando os primeiros emitem vinte vezes mais CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) do que os segundos.

9. Transportar produtos à entrada, dentro e à saída das cidades é um pesadelo;

A maioria das cidades não estão projetadas nem equipadas para o transporte, armazenamento e manuseamento de cargas. Isto faz com que a alimentação das empresas e dos consumidores nestes ambientes seja um pesadelo, criando ao mesmo tempo uma preocupação social no tráfego, no ruído e na poluição.

10. Produtos são movidos desnecessariamente à volta do mundo;

Geralmente, os produtos viajam milhares de quilómetros. Isto poderia ser evitado através de um planeamento de rota mais refinado e/ou pela disponibilização do produto mais próximo do local de procura. A subcontratação do fabrico a países em desenvolvimento contribuiu para este fenómeno. Também fatores como as redes *hub-n-spoke* e como a centralização levaram à criação de apenas um distribuidor central que cobre vastas áreas geográficas, provocando a existência de viagens excessivas.

11. As redes logísticas não são seguras nem robustas;

Existe uma elevada concentração de operações num restrito número de instalações centralizadas de produção e de logística, com rotas ao longo de um número restrito de vias rodoviárias de alto tráfego. Isto faz com que as redes logísticas e as cadeias de abastecimento sejam inseguras perante atos de roubo e atentados terroristas. Que não sejam robustas quando ocorrem desastres naturais nem quando surgem crises de procura. A vulnerabilidade, o risco e a resiliência das redes logísticas e das cadeias de abastecimento são, cada vez mais, problemas críticos.

### 12. Sistemas tecnológicos e automatizados são difíceis de justificar;

O exemplo da histórica diferença de largura dos carris dos comboios entre Espanha e França, que fazia com que os comboios provenientes de um dos países não circulassem no outro, ainda se aplica atualmente, nas múltiplas vertentes do manuseamento de materiais, na sua armazenagem bem como na sua expedição. Isto faz com que seja muito difícil de justificar tecnologias inteligentes interligação, sistemas de manuseamento, transporte automatizado bem como *software* de colaborativo inteligente.

### 13. A inovação está estrangulada;

A inovação está afunilada, especialmente devido à falta de padrões genéricos, protocolos, transparência, padronização (modularização) e pela inexistência de infraestruturas abertas.

#### 2.2.2 Conceito da PI

O termo *Physical Internet* (PI) é um conceito que aborda a otimização do processo logístico com intuito de obter uma cadeia de abastecimento mais eficiente. Este processo baseia-se na interligação e intercomunicação entre diversas cadeias logísticas, através de protocolos de colaboração standardizados, por contentores modulares e interfaces inteligentes para o aumento da sustentabilidade e da eficiência da cadeia. (Ballot et al. (2014) em (Treiblmaier et al., 2016))

Para (Benoit Montreuil et al., 2012), a PI representa um sistema logístico global, interconectado e sustentável. É baseado em contentores normalizados que são facilmente transportados por diversos meios de transporte (ex. avião, camião, carros). Os contentores são facilmente movimentados por redes de transporte distribuídas e multimodais, e em cada mudança as cargas poderão ser reorganizadas, independentemente da origem, de forma a otimizar a carga para os segmentos

seguintes. A estas redes pertencem armazéns e centros logísticos abertos, permitindo uma rede logística global.

A PI combina contentores standardizados, modulares e inteligentes com novos protocolos logísticos e novos modelos de negócio, resultando num sistema logístico e de distribuição colaborativo, altamente distribuído e especializado. Neste tipo de estrutura os bens são armazenados em contentores de dimensões modulares e são encaminhados e distribuídos para o seu destino, usando meios de transporte, de armazenamento e de manuseamento compartilhados e altamente eficientes. Ao longo deste percurso são monitorizados através de um identificador da PI, tal como acontece com os blocos de dados na internet. (Benoit Montreuil et al., 2010)

O objetivo da PI é interconectar universalmente as redes logísticas através de padrões mundiais de contentores modulares, de interfaces e protocolos de forma a aumentar a eficiência e a sustentabilidade da logística mundial. A ideia é fazer no mundo físico o que é feito no mundo digital pela internet. (B. Montreuil et al., 2012)

Segundo os mesmos autores, a mudança de paradigma da PI é que a logística atual tem por base maioritariamente redes operacionais fechadas com meios heterogêneos, esta deve ser repensada como a Internet, por meio de uma estrutura operacional comum, facilitando a redefinição de cargas de transporte e o seu manuseamento. A PI permite a integração progressiva de redes logísticas dedicadas a um sistema interconectado universalmente.

De acordo (Maslarić et al., 2016) a palavra chave da PI é a interconectividade universal, que deverá garantir cooperação total entre todos os participantes de uma cadeia de abastecimento, total compatibilidade entre todos os recursos e soluções técnicas e tecnológicas e a otimização geral de todas as operações. A chave para o estabelecimento deste conceito está na interconectividade digital universal, em cargas e interfaces modulares (interconectividade física) e, por fim, nos protocolos e procedimentos (interconectividade operacional). A PI pretende transformar a logística na direção da interconexão universal e eficiente de todas as redes logísticas, permitindo que os utilizadores pensem e atuem em redes de mobilidade global abertas e redes de abastecimento.

Para (Crainic & Montreuil, 2016), as redes logísticas permitem mudar para um transporte híper conectado muito mais distribuído, desmultiplicando viagens origem-destino em múltiplos segmentos entre centros logísticos abertos, cada segmento gerido dinamicamente com modos, meios e negócios apropriados. No que diz respeito à distribuição, permite que as empresas coloquem o seu stock em múltiplos armazéns e centros de distribuição abertos perto dos mercados, permitindo entregas rápidas e de curta distância aos clientes, em detrimento da exploração dos seus centros de distribuição dedicados. A PI usa a mesma estrutura quer para o nível local quer para o nível global, municipal ou regional. Introduce inovação cultural, tecnológica, de infraestruturas, legislativa e de modelos de negócio.

A PI é sobre redes de redes, cada uma incorporando nós e elos de ligação entre esses nós, usando contentores modulares padronizados. A sua introdução aponta para uma melhoria radical na sustentabilidade económica, ambiental e social do transporte, manuseamento, armazenamento, fornecimento, produção e uso dos bens físicos. (Benoit Montreuil et al., 2010)

### 2.2.3 Estrutura física da PI

Para alcançar completamente o conceito da PI têm de ser considerados, simultaneamente, diversos fatores, tanto objetos físicos como os contentores e os centros logísticos, assim como conceitos mais abstratos como a legislação e os modelos de negócio. (Treiblmaier et al., 2016)

Na apresentação dos elementos da PI estes são apresentados com o símbolo “ $\pi$ ”, que corresponde em Grego a pi sendo as letras que identificam este conceito. Este elemento serve para diferenciar os elementos desenvolvidos para a PI dos elementos tradicionais. (Benoit Montreuil et al., 2010)

Segundo os mesmos autores, a PI não manipula componentes físicos, quer sejam materiais, peças, merchandising, ou outros produtos. Manipula apenas caixas

desenhadas pela PI que contêm estes bens físicos. A este tipo de caixas é dado o nome de  $\pi$ -containers.

Estes  $\pi$ -containers devem ser fáceis de manusear, de armazenar, de transportar, de selar, de interligar uns com os outros, de carregar/descarregar, de construir e destruir. Estão devidamente etiquetados com um código, que disponibiliza toda a informação da sua identificação, da sua integridade, da sua rota, do seu acondicionamento, a sua monitorização, da sua rastreabilidade e da sua segurança durante o seu percurso nos meios da PI. Esta etiquetagem permite uma reorganização de carga e processo logístico, muito mais automatizada. (Benoit Montreuil et al., 2010)

A figura 2 representa a modularidade dos  $\pi$ -containers. Pode verificar-se que os  $\pi$ -containers se combinam entre si, formando cargas compostas que, mais tarde, podem ser decompostas individualmente ou em novas combinações. (Benoit Montreuil, 2011)

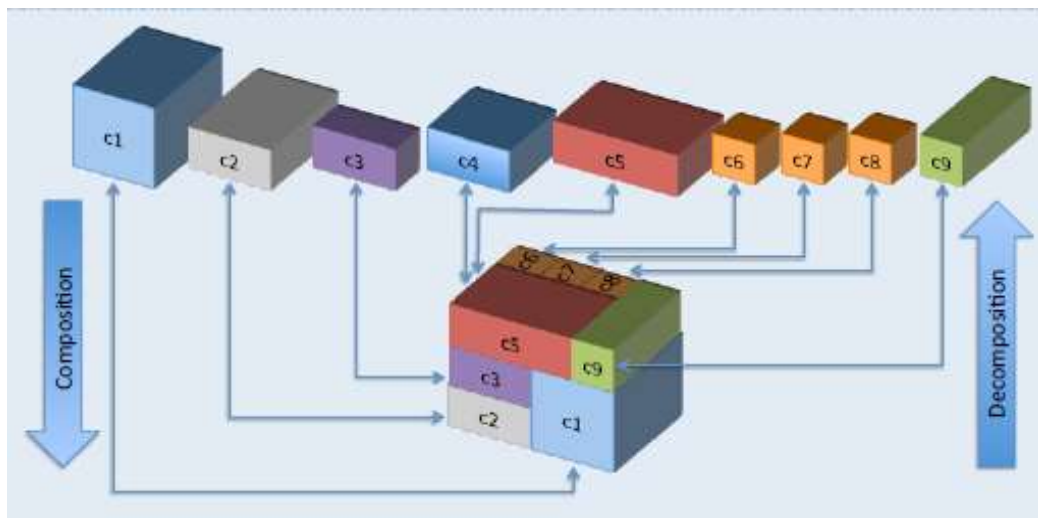


Figura 2 - Ilustração da modularidade dos  $\pi$ -Container (Benoit Montreuil, 2011)

Para (Benoit Montreuil et al., 2010), existem três tipos de elementos físicos que são a chave para o conceito da PI. São eles os contentores, os nós de comunicação e os movimentadores. A figura 3 apresenta estes elementos.

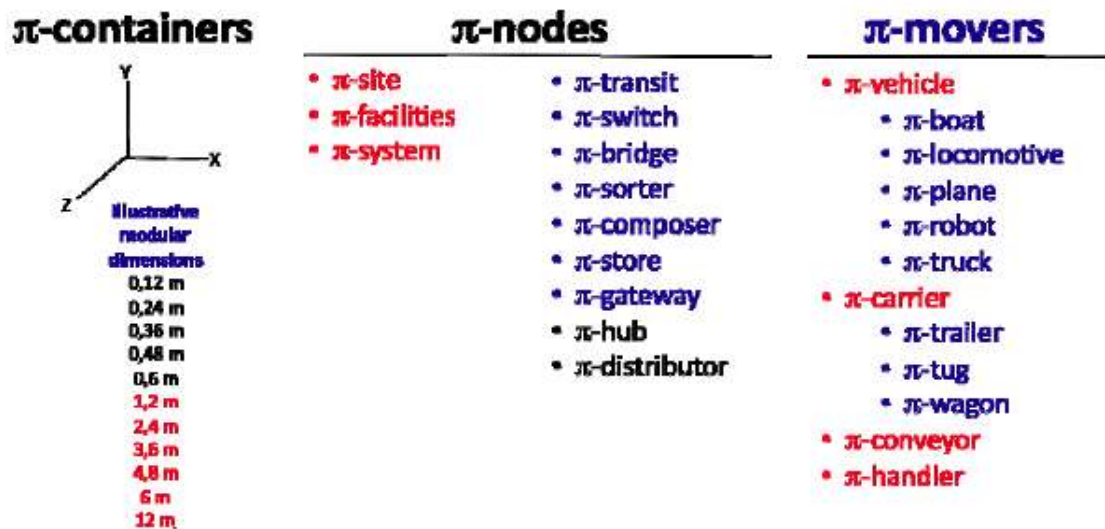


Figura 3 - Elementos chave da PI (Benoit Montreuil et al., 2010)

Segundo os mesmos, os contentores ( $\pi$ -containers) são as unidades de carga fundamentais, que são movidas, manuseadas e armazenadas na PI. Como demonstra a figura 3, estes elementos têm dimensões modulares. Os nós de comunicação ( $\pi$ -nodes) dizem respeito aos locais, armazéns e aos sistemas físicos da PI. Os movimentadores ( $\pi$ -movers) permitem executar operações de transporte e de manuseamento entre os nós de comunicação.

Para (Benoit Montreuil, 2011) na PI não existe um conceito generalista de manuseamento e armazenamento para todas as finalidades. Apenas existem sistemas de armazenamento e manuseamento de sistemas de  $\pi$ -containers que contêm tecnologias e processos inovadores que exploram as características dos mesmos. De maneira a permitir a sua entrada, armazenamento, compactação, decomposição, monitorização, proteção e saída de modo rápido, barato, fácil e confiável por meio de soluções inteligentes, sustentáveis e integrando automatização e manuseamento humano.

Na PI os  $\pi$ -containers são geralmente movimentados por  $\pi$ -movers. A movimentação é aqui usada como um genérico para o transporte, manuseamento, elevação e manipulação. Os principais tipos de  $\pi$ -movers são os  $\pi$ -transporters, os  $\pi$ -conveyors e os  $\pi$ -handlers, estes últimos dizem respeito a humanos qualificados para lidar com os  $\pi$ -containers. Todos os  $\pi$ -movers podem armazenar  $\pi$ -containers, embora

não seja a sua função principal. Os  $\pi$ -transporters são compostos pelos  $\pi$ -vehicles e pelos  $\pi$ -carriers, e as suas funções são equivalentes às que conhecemos atualmente, com a especificidade de que estes são construídos e desenvolvidos para manusear e operar os elementos da PI. (Benoit Montreuil et al., 2010)

Para (Benoit Montreuil, 2011) os sistemas de armazenamento e de movimentação da PI têm as seguintes características:

- Permitir entradas e saídas de forma rápida e confiável;
- Interfaces semelhantes nos veículos e nos sistemas de movimentação do produto, bem como com os sistemas de *software* de rastreamento e interface com os  $\pi$ -containers;
- Monitorizar e proteger a integridade dos  $\pi$ -containers;
- Protegem os  $\pi$ -containers para o nível pretendido;
- Fornecem documentação em tempo real dos níveis de desempenho e de capacidades requeridos, bem como demonstram através de atualizações contínuas os níveis atingidos.

Os  $\pi$ -nodes são locais desenhados especificamente para realizar operações em  $\pi$ -containers, tais como: receber, testar, mover, encaminhar, selecionar, manusear, posicionar, armazenar, picagem, monitorizar, etiquetar, montar, desmontar dobrar, encaixar, desencaixar, compor, decompor e expedir  $\pi$ -containers. Existe uma variedade de  $\pi$ -nodes a fornecer serviços de naturezas distintas, desde uma simples transferência de  $\pi$ -carriers entre  $\pi$ -veicles até combinações complexas de diversos meios/operações de transferência e manuseamento de  $\pi$ -containers. (Benoit Montreuil et al., 2010)

Segundo os mesmos autores, os  $\pi$ -nodes são locais onde existe a conexão com as atividades logísticas. Estas atividades podem ser físicas, como mudar de um meio de transporte para outro, podem ser alterações contratuais, como a alteração de  $\pi$ -containers. Para cada  $\pi$ -node está designada pelo menos uma tarefa logística, de modo a garantir a rastreabilidade dos  $\pi$ -containers através dos diferentes  $\pi$ -nodes.

Segundo (Benoit Montreuil, 2011), os  $\pi$ -nodes são compostos de locais, instalações e sistemas, nomeadamente:

- *$\pi$ -transit*: responsáveis por transferir  *$\pi$ -carriers* (que contêm os  *$\pi$ -containers*) dos  *$\pi$ -veicles* de chegada para a saída;
- *$\pi$ -switch*: transfere de forma unimodal os  *$\pi$ -containers* de um  *$\pi$ -mover* de entrada para um  *$\pi$ -mover* de saída;
- *$\pi$ -bridge*: transfere de forma multimodal  *$\pi$ -containers* por meio de uma base um-por-um;
- *$\pi$ -sorter*: recebe  *$\pi$ -containers* de um ou vários pontos de entrada e classifica-os de modo a enviar cada um deles para um ponto de saída definido, potenciado por uma ordem específica.
- *$\pi$ -composer*: constrói  *$\pi$ -containers* compostos a partir de conjuntos específicos de  *$\pi$ -containers* menores, geralmente de acordo com um esquema tridimensional especificado e/ou desmontar  *$\pi$ -containers* compostos em vários  *$\pi$ -containers* menores que podem ser unitários ou compostos;
- *$\pi$ -store*: armazena  *$\pi$ -containers* durante o tempo definido para cada caso;
- *$\pi$ -gateway*: recebe  *$\pi$ -containers* e liberta-os da rede da PI permitindo que este e o seu conteúdo seja acedido em redes privadas e/ou recebe  *$\pi$ -containers* vindos de redes privadas, regista-os na PI e encaminha-os para o seu primeiro destino na rede da PI;
- *$\pi$ -hub*: transfere  *$\pi$ -containers* de  *$\pi$ -movers* de entrada para  *$\pi$ -movers* de saída.

Cada um dos itens acima mencionados é estritamente dedicado para  *$\pi$ -containers* e desenhados para trabalhar suavemente e eficientemente na PI. Assim, eles são, em geral, mais simples e mais padronizados do que as estruturas comparáveis atuais.

Na PI, a paleta que hoje conhecemos perde o seu sentido prático devido ao facto dos  *$\pi$ -lift-trucks* apenas movimentarem e armazenarem  *$\pi$ -containers* que foram desenhados para serem movimentados, empilhados, interligadas, etc. Estes  *$\pi$ -containers* tem meios que permitam fixar-se aos  *$\pi$ -movers* sem terem de ser colocados

numa plataforma. Assim sendo, a necessidade do uso de garfos para o suporte da palete como conhecemos hoje, deixa de ser necessário. (Benoit Montreuil et al., 2010)

#### 2.2.4 Redes de transporte usando a PI

O objetivo da PI é interconectar universalmente as redes logísticas usando contentores, interfaces e protocolos modulares universais, com o intuito de melhorar a sustentabilidade mundial da logística. (B. Montreuil et al., 2012)

No transporte usando o conceito da PI os produtos de diversas encomendas são colocados em  $\pi$ -containers que são atribuídos a um ou vários meios de transporte que os encaminham para  $\pi$ -nodes e seguem na rede até chegarem ao destino final. (Hakimi et al., 2012)

A figura 4, representa a uma cadeia de abastecimento simples composta por dois vendedores e dois fabricantes refletindo o impacto da introdução da PI. Na parte superior representa o funcionamento tradicional, em que cada vendedor e cada fabricante tem os seus próprios centros de distribuição dedicados e que cada um otimiza individualmente os seus carregamentos sem comunicação entre eles.

Na parte inferior temos dois estados da logística híper-conectada. Do lado esquerdo apenas é explorada a conectividade do transporte. No lado direito é explorado todo o potencial da PI, usando distribuição e transporte híper-conectados.

No primeiro caso, na PI, a conectividade do transporte, reflete-se na existência de um elevado número de centros logísticos que permitem que os  $\pi$ -containers sejam movidos, reorganizados e despachados, de centro para centro, por meio de um elevado número de transportes disponíveis, independentemente de quem é o dono destes. Em vez de cada entidade ter o seu transporte específico, com uma origem e destino definidos. Cada um coloca os seus bens em  $\pi$ -containers de acordo com o destino e envia-os para o centro logístico mais próximo. Depois o sistema logístico de

transporte híper-conectado, usando diversos transportes e centros, faz com que alcancem o seu destino final.

No segundo caso, fazendo uso de uma distribuição e transporte híper-conectados, os vendedores e os fabricantes não utilizam centros de distribuição dedicados. Eles preferem confiar na disponibilidade de uma rede de centros de distribuição abertos para que os seus  $\pi$ -containers sejam movimentados dinamicamente. (Crainic & Montreuil, 2016)

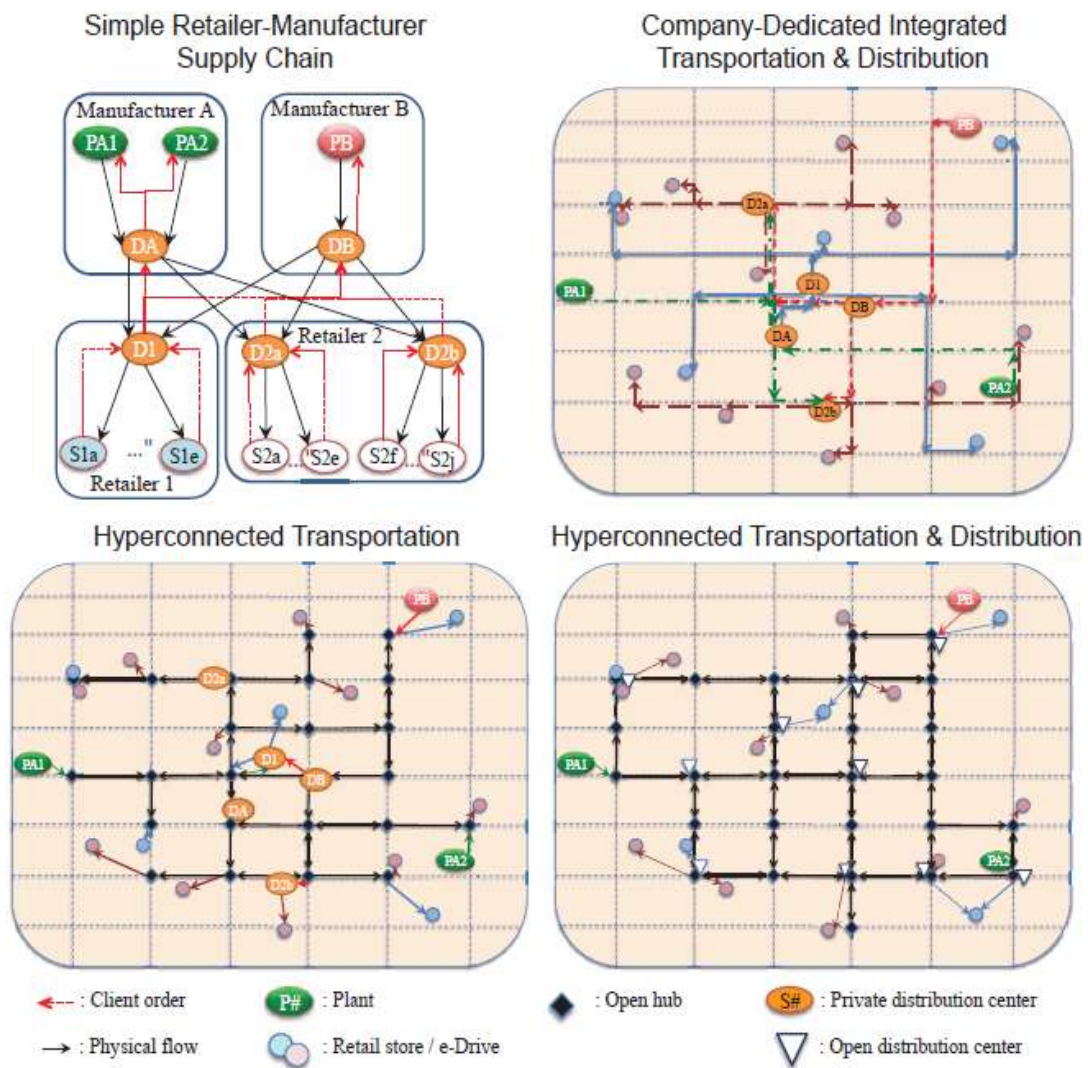


Figura 4 - Transporte dedicado e híper-conectado (Crainic & Montreuil, 2016)

Em (Benoit Montreuil, 2011) é feita uma descrição de um transporte entre Québec e Los Angeles, fazendo uso do método de transporte atual e utilizando a PI.

Pelo método logístico tradicional, um expedidor tendo um caminhão cheio aloca apenas um condutor ao transporte. Este condutor fará esta viagem, que durará vários dias, dormindo no caminhão. Mal chegue ao destino e efetue a descarga, este irá deslocar-se para um novo ponto de recolha, próximo de onde descarregou, para receber uma nova carga e conduzi-la para as proximidades da origem da carga inicial, evitando assim uma viagem em vazio.

Fazendo uso do método da PI, um primeiro condutor faria a viagem do expedidor para o centro logístico mais próximo, numa viagem que duraria entre duas a seis horas, e a mercadoria seria encaminhada para um  $\pi$ -*transit* ou  $\pi$ -*hub*. Este condutor faria a viagem de regresso a Québec com uma nova carga. Um segundo condutor pegaria na carga inicial e transportá-la-ia para o próximo centro logístico. Em alternativa, a carga poderia ser transferida para outros elementos da rede (camiões, comboio avião, etc.). O processo seria repetido até que a carga chegasse a Los Angeles. O emissor ou os seus representantes têm garantido antecipadamente o transporte e estadia da mercadoria em cada  $\pi$ -*transit* ou  $\pi$ -*hub*, para gerir os seus melhores interesses em termos de tempo, risco e preço. As decisões de rota seriam dinâmicas e/ou distribuídas e seriam tomadas à medida que a viagem vai decorrendo.

A palavra chave do conceito da PI é a interconectividade universal, que deve garantir a plena cooperação entre todos os participantes da cadeia de abastecimento, a compatibilidade total de todos os recursos, soluções técnico-tecnológicas e a execução ideal de todas as tarefas. A chave para obter a interconectividade universal é a interconectividade digital, na interconectividade física (contentores modulares e interfaces) e na interconectividade operacional (protocolos e procedimentos operacionais). A PI transforma o conceito logístico na direção da interconexão universal de todas as redes logísticas de uma forma contínua e eficiente, permitindo que os seus utilizadores pensem e atuem em redes globais abertas de mobilidade e de abastecimento. (Maslarić et al., 2016)

### 2.2.5 As *M-Box* do projeto *Modulushca*

Os primeiros passos da realização do conceito da PI foram iniciados através do projeto *Modulushca* (*Modular Logistics Units in Shared Co-modal Networks*), financiado pelo 7º programa-quadro da comissão europeia. Neste projeto estiveram envolvidos departamentos de pesquisa, empresas de logística, empresas dos correios, indústrias dos bens de grande consumo (produtos farmacêuticos, produtos eletrónicos, produtos de uso pessoal, bebidas, tabaco, entre outras), em coordenação com parceiros Norte Americanos e com a iniciativa internacional da PI. (Landschützer et al., 2015)

O objetivo deste projeto era permitir a utilização de unidades de logística modulares desenvolvidas, com tamanhos adequados, para fluxos de transporte simples ou multimodais de bens de grande consumo, fornecendo uma base para um sistema logístico interconectado para 2030. (Modulushca, 2016)

Este projeto integrou cinco áreas que se inter-relacionam entre si. Desenvolver uma visão destinada às necessidades dos utilizadores das cadeias de abastecimento dos bens de grande consumo, desenvolver unidades logísticas modulares que possibilite a construção em bloco ou em unidades menores, estabelecer a interconectividade digital das unidades, desenvolver uma plataforma de operações logísticas interconectadas que possibilite uma redução significativa de custos e de emissões de CO<sub>2</sub> e demonstrar em dois projetos-piloto estas soluções interconectadas. (Modulushca, 2016)

Este projeto desenvolveu, para o contexto dos bens de grande consumo, uma das funções chave da PI, o encapsulamento dos produtos. Este encapsulamento é físico pelo meio de caixas (*M-box*) desenvolvidas e executadas de modo a respeitar os requisitos estabelecidos pela PI. A *M-box* é um  $\pi$ -*container* desenvolvido especificamente no projeto para a acomodação dos bens de grande consumo. (Landschützer et al., 2015)

Uma das primeiras decisões tomada foi a plataforma a usar para a definição das *M-box*, isto é, se forem definidas as dimensões largura (W), profundidade (D) e altura (H) da plataforma, é possível seleccionar as dimensões das caixas modulares. A

plataforma foi definida tendo em consideração as dimensões dos contentores e paletes europeus (paleta  $W=0.8\text{m}$  e  $D=1.2\text{m}$ , contentor  $W=2.44\text{m}$ ,  $D=13.4\text{m}$  e  $H=2.5\text{m}$ ). Assim a plataforma para as *M-Box* assume a sua dimensão máxima com  $W=0.8\text{m}$ ,  $D=1.2$  e  $H=2.4\text{m}$ . Estas dimensões foram divididas dor 1, 2, 3... para obter as dimensões das caixas. Nestas divisões foram excluídos todos os resultados inferiores a  $0,1\text{m}$  e todas as divisões que não fossem inteiras. Com esta solução foram selecionados 440 tamanhos diferentes de *M-Boxes*. A figura 5 ilustra as dimensões possíveis para a *M-box*. (Landschützer et al., 2014)

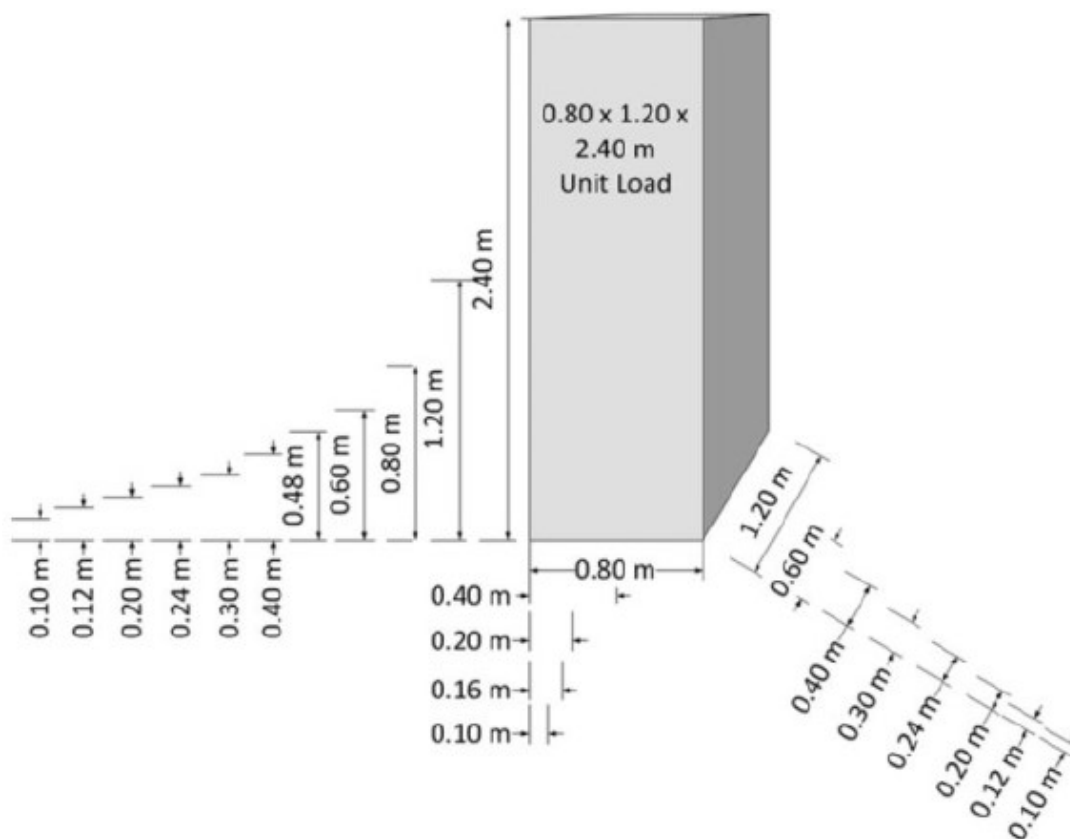


Figura 5 - Plataforma modular para as M-Box (Landschützer et al., 2015)

Em (Landschützer et al., 2015), os autores fazem um estudo a estas caixas desenvolvidas pelo projeto *Modulushca*. Para este teste, sugerem um conjunto de 5 caixas que sugerem ser as dimensões adequadas para o desenvolvimento de futuros estudos e trabalhos. Este conjunto de caixas está representado na figura 6.

Segundo os mesmos, o número de caixas e as suas dimensões poderão ser sempre alterados com o desenvolvimento e estudo desta metodologia. Sugerem que uma possível solução que possibilitaria a utilização de quase todos os tamanhos desenvolvidos pelo projeto, seria a construção de caixas em painéis, de modo a que as suas dimensões pudessem ser construídas consoante as necessidades.

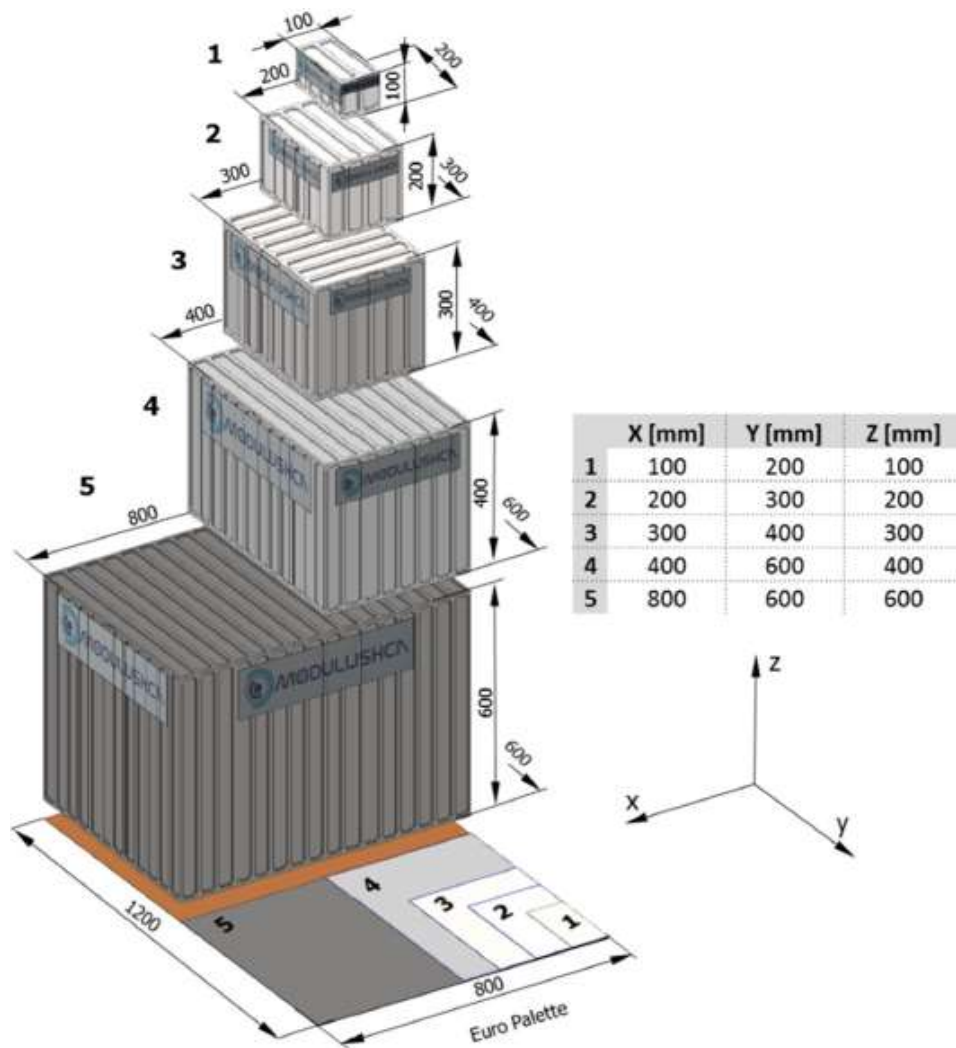


Figura 6 - Dimensões propostas para M-box (Landschützer et al., 2015)

### 2.3 Container loading problem

O termo *container loading problem* (CLP) designa problemas de empacotamento tridimensional típico. Estes problemas envolvem várias aplicações práticas com diferentes objetivos de otimização e diferentes restrições de carregamento. (Zhang et al., 2012)

De acordo com Wascher et al., 2007 em (Ramos et al., 2016), nos problemas de CLP, um determinado número de caixas retangulares de pequenas dimensões têm de ser empacotadas ortogonalmente num conjunto de contentores de maiores dimensões, de modo a que essas não se sobreponham e, todas as caixas do mesmo conjunto estejam no mesmo contentor.

Ainda segundo os mesmos, o CLP é um problema de afetação, no qual existem dois objetivos possíveis: maximização do valor expedido ou a minimização dos custos. O primeiro refere-se a problemas onde o número de contentores não é suficiente para acomodar todas as caixas, portanto o objetivo é a maximização do número de caixas acomodadas no contentor. O segundo diz respeito a problemas em que o número de contentores é suficiente para receber todas as caixas e por isso o objetivo é minimizar o custo dos contentores a usar.

Neste tipo de problemas é comum que seja feita uma distinção dos diferentes tipos de carga. Se as caixas são semelhantes, são consideradas homogéneas, já no caso de existir elevada variedade de caixas, é considerado muito heterogéneo e, se a diversidade de caixas for reduzida, então é denominada de pouco heterogénea. (Pisinger, 2002)

Em (Zhao et al., 2014) é feita uma classificação dos tipos de problemas de CLP, tendo por base a definição do tipo de problema e do tipo de caixas e de contentores que irão ser utilizados. Todos os problemas descritos assumem que as dimensões dos contentores são fixas.

Para os casos de minimização dos custos existem seis variantes possíveis:

- *Single stock-size cutting stock problem* – se os contentores são idênticos e as caixas são pouco heterogéneas;

- *Single bin-size bin packing problem* – se os contentores são idênticos e as caixas são muito heterogéneas;
- *Multiple stock-size cutting stock problem* – se os contentores e as caixas são pouco heterogéneas;
- *Multiple bin-size bin packing problem* – se os contentores são pouco heterogéneos e as caixas muito heterogéneas;
- *Residual cutting stock problem* – se os contentores são muito heterogéneos e as caixas pouco heterogéneas;
- *Residual bin packing problem* – se os contentores e as caixas são muito heterogéneos.

Nos casos de maximização do valor expedido existem as seguintes possibilidades:

- *Identical item packing problem* – se existe apenas um contentor e as caixas são idênticas;
- *Single large object placement problem* – se há só um contentor e as caixas são pouco heterogéneas;
- *Single knapsack problem* – se apenas existe um contentor e as caixas são muito heterogéneas;
- *Multiple identical large object placement problem* – se existem vários contentores idênticos e as caixas são pouco heterogéneas;
- *Multiple heterogeneous large object placement problem* – se os contentores são muito ou pouco heterogéneos e as caixas são pouco heterogéneas;
- *Multiple identical knapsack problem* – se existem vários contentores idênticos e as caixas são muito heterogéneas;
- *Multiple heterogeneous knapsack problem* – se os contentores são muito ou pouco heterogéneos e as caixas são muito heterogéneas.

(Bischoff & RatCliff, 1995), designam algumas restrições fundamentais para a resolução deste tipo de problemas, nomeadamente:

- Orientação;

Esta restrição pode ser apenas vertical (o típico “*this way up*”), ou horizontal (pela forma como o empilhador tem de pegar na palete), ambos ou ainda um plano pré-determinado atribuído à palete ou caixa.

- Resistência de empilhamento;

Dependendo do tipo de caixas e do peso que estas possam suportar, pode ser imposta uma restrição de acomodação vertical de caixas.

- Manuseamento;

O peso, a dimensão ou até os equipamentos necessários à carga e descarga das caixas podem determinar a posição de uma caixa num contentor.

- Estabilidade de carga;

É necessário assegurar que a carga não se move durante o transporte.

- Grupos de caixas;

Para facilitar a procura e verificação de carga, as caixas com dimensões semelhantes devem estar agrupadas, próximas umas das outras.

- Múltiplos destinos;

Quando existe uma carga com múltiplos destinos, as caixas para o mesmo destino devem estar agrupadas juntas e deve ser também tida em conta a rota de distribuição, de modo a evitar cargas e descargas desnecessárias.

- Separação de carga;

No caso de haver materiais que possam ser danificados ao entrarem em contacto com outros (ex: químicos), deve ser garantida a separação entre estes materiais.

- Carga completa de grupos de artigos;

Nos casos em que diversos artigos fazem parte do mesmo grupo, mas, por questões administrativas, são tratados como encomendas distintas, estas devem ser enviadas conjuntamente.

- Prioridades de envio;

Caixas com prazos de entrega mais curtos, devem ter prioridade face a caixas com outros mais elevados.

- Complexidade de carga;

O resultado de carregamentos mais complexos é o aumento das operações de manuseamento, bem como o aumento da sua dificuldade. A carga deve ter em consideração as limitações tecnológicas de manuseamento de mercadoria.

- Limite de peso do contentor;

Se a carga é especialmente pesada, esta restrição deve assumir um papel mais importante do que a otimização do espaço.

- Distribuição de peso do contentor;

Por questões de transporte e manuseamento o centro de gravidade do contentor deve ser perto do ponto médio geométrico do chão do contentor.

Mais tarde, (Zhao et al., 2014), identificou três restrições básicas que são fundamentais para os problemas de CLP, designadamente:

- As caixas apenas podem ser empacotadas de modo a que os seus dados sejam paralelos aos do contentor;
- Todas as caixas devem ser colocadas dentro dos limites do contentor;
- As caixas não se podem intersectar.

Para além destas restrições básicas, existem também diversas restrições práticas, como a orientação das caixas, estabilidade, empilhamento, distribuição de peso, capacidade de suporte, priorização, etc.

Em (Bortfeldt & Wäscher, 2013) é apresentada uma análise à bibliografia publicada entre 1980 e 2011. São também definidos e explicados os métodos de resolução deste tipo de problemas. Para os autores, são três os métodos de resolução dos CLP:

- Modelos matemáticos;

Normalmente classificados como lineares, inteiros ou binários, estes modelos têm como vantagem a sua resolução através de *softwares* padrão (ex. CPLEX). Estes permitem o acesso a mais informação sobre os valores e limites ótimos da função objetivo.

- Modelos exatos ou algoritmos de aproximação;

Os problemas de corte e empacotamento multidimensionais são problemas de otimização combinada de dificuldade *NP-Hard*. Os algoritmos de aproximação poderão não obter a solução ótima para o problema, mas garantem uma boa qualidade da solução.

- Heurísticas e testes por sets.

As heurísticas são os modelos de resolução de CLP mais usados na literatura, pois permitem obter soluções de qualidade razoável, dentro de tempos de computação aceitáveis e para problemas com tamanho e restrições mais aproximados da realidade.

(Chen et al., 1995) propõe um modelo de minimização de custos com rotação de caixas, baseado num modelo de MIP (*Mixed Integer linear Programming*). A principal característica deste modelo é que são consideradas caixas com dimensões variáveis. (Silva et al., 2019)

Considerando um problema geral de CLP, ou seja, selecionar um determinado número de contentores para carregar um determinado número de caixas. Tanto contentores como caixas podem ter dimensões variáveis. O objetivo deste modelo é minimizar o espaço não utilizado. (Chen et al., 1995)

Este modelo será a base de estudo deste trabalho e será apresentado detalhadamente no capítulo do desenvolvimento.



# DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Descrição do problema
- 3.2 Análise de resultados



### 3 DESENVOLVIMENTO

Como foi referido anteriormente, o principal objetivo desta dissertação é “testar” a utilidade (vantagens e desvantagens) da PI. Assim sendo, escolheu-se o modelo desenvolvido por (Chen et al., 1995), para análise.

Efetivamente, a escolha deste modelo fundamenta-se por este se enquadrar nos modelos matemáticos, logo permite a resolução recorrendo ao CPLEX, por este não ser restritivo no que ao tipo de caixas diz respeito. Também pelo facto deste modelo ser a base de desenvolvimento de outros modelos e apresentar uma restrição da rotação das caixas que poderá permitir uma maior possibilidade de soluções.

Portanto, serão efetuadas otimizações, usando o programa de otimização “IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.10.0”, com dimensões de caixas atualmente disponíveis no mercado e com as caixas desenvolvidas através do projeto *Modulushca*.

Em suma, com este estudo pretende-se observar a influência que as caixas da PI poderão ter na resolução deste tipo de problemas, nomeadamente na redução do tempo de execução e na otimização do espaço utilizado (devido à correlação entre as suas dimensões).

#### 3.1 Descrição do problema

Para a análise deste problema apenas serão consideradas restrições primárias, nomeadamente a não sobreposição de caixas e estas têm de ser colocadas completamente dentro do contentor.

(Chen et al., 1995) assumem que, a dimensão do contentor é conhecida, bem como a quantidade e as dimensões das caixas. Cada caixa é tratada como uma entrada

independente e é colocada ortogonalmente no contentor. À maior medida da caixa ou contentor corresponde ao comprimento, à seguinte corresponde a largura e a mais pequena a altura. Ao comprimento do contentor corresponde o eixo X, à largura o eixo Y e à altura o eixo Z. O ponto frontal-esquerdo-inferior (FLB) é considerado a origem do sistema de eixos. A tabela 1 refere-se às variáveis definidas pelos autores.

Tabela 1 – Variáveis do Problema

Variável	Descrição
$N$	Número total de caixas a serem empacotadas
$m$	Número total de contentores disponíveis
$M$	Número arbitrado de grande dimensão
$s_{ij}$	Variável binária, assume 1 se a caixa $i$ está colocada no contentor $j$ , e 0 caso contrário
$n_j$	Variável binária, assume 1 se o contentor $j$ está a ser utilizado
$(p_i, q_i, r_i)$	Respetivamente comprimento, largura e altura da caixa $i$
$(L_j, W_j, H_j)$	Respetivamente comprimento, largura e altura do contentor $j$
$(x_i, y_i, z_i)$	Variáveis contínuas que indicam as coordenadas do ponto frontal-esquerdo-inferior (FLB) da caixa $i$
$(l_{xi}, l_{yi}, l_{zi})$	Variáveis binárias que indicam se o comprimento da caixa é paralelo ao eixo X, Y ou Z do contentor
$(w_{xi}, w_{yi}, w_{zi})$	Variáveis binárias que indicam se a largura da caixa é paralela ao eixo X, Y ou Z do contentor
$(h_{xi}, h_{yi}, h_{zi})$	Variáveis binárias que indicam se a altura da caixa é paralela ao eixo X, Y ou Z do contentor
$a_{ik}$	Variável binária que indica se a caixa $i$ está à esquerda da caixa $k$ .
$b_{ik}$	Variável binária que indica se a caixa $i$ está à direita da caixa $k$ .
$c_{ik}$	Variável binária que indica se a caixa $i$ está atrás da caixa $k$ .
$d_{ik}$	Variável binária que indica se a caixa $i$ está à frente da caixa $k$ .
$e_{ik}$	Variável binária que indica se a caixa $i$ está por baixo da caixa $k$ .
$f_{ik}$	Variável binária que indica se a caixa $i$ está por cima da caixa $k$ .

$a_{ik}, b_{ik}, c_{ik}, d_{ik}, e_{ik}$  e  $f_{ik}$  apenas são definidas e necessárias se  $i < k$ .

A figura 7 ajuda a compreender as variáveis definidas na tabela 1. No contentor  $j$  estão colocadas duas caixas ( $i$  e  $k$ ), por isso, as variáveis  $s_{ij}$  e  $s_{kj}$  assumem o valor de 1. A caixa  $i$  está colocada à esquerda e atrás da caixa  $k$ , por isso  $a_{ik}$  e  $d_{ik}$  assumem também o valor de 1. Como a caixa  $k$  está posicionada com o seu comprimento sobre o eixo  $Z$  e a largura sobre o eixo  $X$  as variáveis  $l_{zk}$ ,  $w_{xk}$  e  $h_{yk}$  assumem o valor de 1. Assim para a Figura 1 a definição de variáveis será a seguinte:

$$\begin{array}{llll}
 l_{xi} = 1; l_{yi} = 0; l_{zi} = 0 & l_{xk} = 0; l_{yk} = 0; l_{zk} = 1 & a_{ik} = 1 & b_{ik} = 0 \\
 w_{xi} = 0; w_{yi} = 0; w_{zi} = 1 & w_{xk} = 1; w_{yk} = 0; w_{zk} = 0 & c_{ik} = 0 & d_{ik} = 1 \\
 l_{xi} = 1; l_{yi} = 0; l_{zi} = 0 & l_{xk} = 0; l_{yk} = 0; l_{zk} = 1 & e_{ik} = 0 & f_{ik} = 0
 \end{array}$$

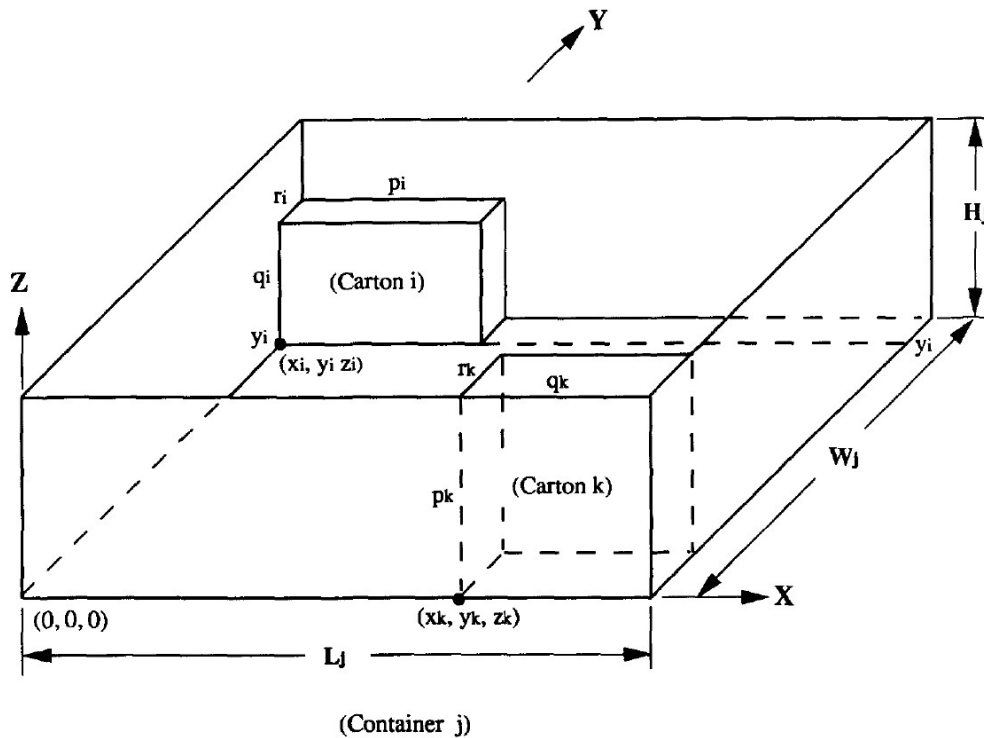


Figura 7 - Definição das variáveis (Chen et al., 1995)

O modelo matemático apresentado pelos autores define-se nas seguintes equações:

$$\min \sum_{j=1}^m L_j * W_j * H_j * n_j - \sum_{i=1}^N p_i * q_i * r_i \quad (1)$$

Sujeito a,

$$x_i + p_i * l_{xi} + q_i * w_{xi} + r_i * h_{xi} \leq x_k + (1 - a_{ik}) * M \quad \forall i, k, \quad i < k, \quad (2)$$

$$x_k + p_k * l_{xk} + q_k * w_{xk} + r_k * h_{xk} \leq x_i + (1 - b_{ik}) * M \quad \forall i, k, \quad i < k, \quad (3)$$

$$y_i + q_i * w_{yi} + p_i * l_{yi} + r_i * h_{yi} \leq y_k + (1 - c_{ik}) * M \quad \forall i, k, \quad i < k, \quad (4)$$

$$y_k + q_k * w_{yk} + p_k * l_{yk} + r_k * h_{yk} \leq y_i + (1 - d_{ik}) * M \quad \forall i, k, \quad i < k, \quad (5)$$

$$z_i + r_i * h_{zi} + q_i * w_{zi} + p_i * l_{zi} \leq z_k + (1 - e_{ik}) * M \quad \forall i, k, \quad i < k, \quad (6)$$

$$z_k + r_k * h_{zk} + q_k * w_{zk} + p_k * l_{zk} \leq z_i + (1 - f_{ik}) * M \quad \forall i, k, \quad i < k, \quad (7)$$

$$a_{ik} + b_{ik} + c_{ik} + d_{ik} + e_{ik} + f_{ik} \geq s_{ij} + s_{kj} - 1 \quad \forall i, j, k, \quad i < k, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^m s_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N s_{ij} \leq M * n_j \quad \forall j \quad (10)$$

$$x_i + p_i * l_{xi} + q_i * w_{xi} + r_i * h_{xi} \leq L_j + (1 - s_{ij}) * M \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$y_i + q_i * w_{yi} + p_i * l_{yi} + r_i * h_{yi} \leq W_j + (1 - s_{ij}) * M \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$z_i + r_i * h_{zi} + q_i * w_{zi} + p_i * l_{zi} \leq H_j + (1 - s_{ij}) * M \quad \forall i, j \quad (13)$$

$$l_{xi} + l_{yi} + l_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (14)$$

$$w_{xi} + w_{yi} + w_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (15)$$

$$h_{xi} + h_{yi} + h_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (16)$$

$$l_{xi} + w_{xi} + h_{xi} = 1 \quad \forall i \quad (17)$$

$$l_{yi} + w_{yi} + h_{yi} = 1 \quad \forall i \quad (18)$$

$$l_{zi} + w_{zi} + h_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (19)$$

$$l_{xi}, l_{yi}, l_{zi}, w_{xi}, w_{yi}, w_{zi}, h_{xi}, h_{yi}, h_{zi} \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (20)$$

$$a_{ik}, b_{ik}, c_{ik}, d_{ik}, e_{ik}, f_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k, \quad i < k, \quad (21)$$

$$s_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (22)$$

$$n_j \in \{0,1\} \quad \forall j \quad (23)$$

$$x_i + y_i + z_i \geq 0 \quad \forall i \quad (24)$$

A equação (1) é a função objetivo do problema, cujo objetivo é minimizar o espaço total que não é utilizado no contentor. As equações (2)-(8) são as restrições que garantem que as caixas não se sobrepõem. A equação (9) garante que uma caixa é colocada apenas num contentor. A equação (10) garante que o contentor é usado, caso seja lá colocada uma caixa. As equações (11) a (13) garantem que as caixas colocadas nos contentores estão enquadradas com as dimensões dos contentores. As equações (14) a (19) refletem as relações existentes entre as diferentes variáveis binárias. As restantes restrições, (20) a (24) são as variáveis gerais do sistema. (Chen et al., 1995) e (Silva et al., 2019)

Partindo da formulação de (Chen et al., 1995), executaram-se testes de otimização do modelo, no qual foram analisados diferentes aspetos, nomeadamente a percentagem de volume ocupado, a variabilidade de caixas e também o número de caixas utilizadas. Estes aspetos foram analisados quer usando a metodologia da PI, quer usando caixas existentes no mercado.

É de salientar que neste estudo definiu-se que:

- As dimensões do contentor seriam: comprimento 1200mm, largura 800mm e altura 800mm;
- Os testes a realizar estariam divididos em três grupos distintos consoante o volume que ocupam, designadamente VC70, VC80 e VC90. A nomenclatura significa, para o caso VC70, que o volume ocupado pelas caixas será de aproximadamente 70%.
- A variação de volume para as otimizações poderá ser de  $\pm 3\%$ ;
- A variabilidade de caixas a analisar seria de 2, 3 e 4 tipos de caixas diferentes;
- O número mínimo de caixas de um tipo será de 3 unidades;
- Foram analisados grupos de 20 a 90 caixas, com incrementos de 10 unidades;

- Para as caixas existentes no mercado, foram selecionadas, aleatoriamente 6 tipos de caixas, de um catálogo genérico de um fornecedor (*Plastic Containers and Pallets*, n.d.). A tabela 2 reflete as dimensões destas caixas;
- Para as caixas desenvolvidas pelo método da PI, foram utilizadas as caixas desenvolvidas pelo projeto *Modulushca*, apresentadas por (Landschützer et al., 2015);
- O método de seleção de caixas será o definido no algoritmo de seleção de caixas;
- O tempo máximo de otimização seria 30 minutos (1800s).

As otimizações foram executadas usando o programa “*IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.10.0*” fazendo uso dos parâmetros de resolução base. As otimizações correram num Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.6GHz com 8 GB de RAM

Tabela 2 – Caixas sem metodologia PI (*Plastic Containers and Pallets*, n.d.)

Descrição	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
Delta 21	325	260	254
Delta mec 9	400	300	100
Delta mec 22	400	300	220
Delta 30	440	375	190
Delta 60	535	365	290
Delta mec 60 L	600	400	320

Tabela 3 – Caixas desenvolvidas pela PI (Landschützer et al., 2015)

Descrição	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
M-Box 1	200	100	100
M-Box 2	300	200	200
M-Box 3	400	300	300
M-Box 4	600	400	400
M-Box 5	800	600	600

### Algoritmo de seleção de caixas

De modo a formular as listagens de caixas a utilizar nas otimizações, foi desenvolvido um algoritmo de seleção de caixas. Este algoritmo irá usar os dados das caixas expostas nas tabelas 2 e 3 para satisfazer as condições definidas, nomeadamente o volume ocupado, o número de caixas e a variabilidade destas.

Esta metodologia necessita como dados de entrada o número de caixas a usar ( $n$ ), a percentagem de volume que poderão ocupar ( $VC$ ) e o número de tipos de caixas diferentes a usar ( $d$ ).

Tomando como exemplo uma otimização com  $n=20$  caixas,  $VC=70\%$  e  $d=2$ , este algoritmo, numa primeira fase, selecionará todas as soluções de 2 caixas diferentes cujo somatório do seu volume seja 70% do volume do contentor. Numa segunda fase o algoritmo eliminará as soluções que não respeitem a condição do número mínimo de caixas e do número total de caixas. No final retorna uma solução aleatória dentro das soluções possíveis.

O algoritmo define-se da seguinte forma:

**Input:** n, VC, d

**Output:** v[C<sub>i</sub>xL<sub>i</sub>xA<sub>i</sub>,...][QT<sub>i</sub>,...]

➤ v[dimensãocaixa][numero de caixas]

**Variable:** caixas[[]], y, soma, caixas\_res[[]]

**Begin**

caixas[[]] ← **Call** Conjuntos\_Caixas(d, VC)

➤ Encontra todas as combinações caixas de d caixas diferentes e VC de volume ocupado

**if** caixas[[]] = null **then**

**return** FALSE

**end if**

**for** each caixa belongs to caixas **do**

    y ← TRUE

    soma ← 0

**for** each x belongs to caixa.length **do**

        soma ← soma + x.quantidade

**if** x.quantidade < 3 **then**

            y ← FALSE

**end if**

**end for**

**if** y=TRUE and soma=n **then**

        caixas\_res.add (caixa)

**end if**

➤ Filtra as combinações anteriormente definidas para apenas as que têm pelo menos 3 caixas de cada tipo

➤ Verificação do número de caixas

➤ Conjunto das soluções encontradas

**end for**

**if** caixas\_res[[]] ≠ null

**RETURN** random(caixas\_res[[]])

➤ Atribuição de uma solução

**else**

**RETURN** FALSE

**end if**

**End**

### 3.2 Análise de resultados

No decorrer do estudo, à medida que se obtiveram soluções, foi verificado o parâmetro “GAP”, que é o indicador da percentagem de satisfação de uma solução. Se a solução for ótima, apresenta o valor de 0%. Se for obtida uma solução parcial, indica a percentagem de satisfação face à solução ótima. Caso não encontre uma solução, esse valor não é definido.

Importa referir que em todas as otimizações, em que se obteve uma solução dentro do tempo estipulado, foi obtida uma solução ótima. Já para as otimizações que não obtiveram solução dentro do tempo estipulado o parâmetro não teve valor, isto significa que não foram registadas soluções parciais.

As tabelas 4 a 9 apresentam os valores dos tempos de otimização obtidos nos diferentes testes. As tabelas 4, 5 e 6 dizem respeito às otimizações sem o uso da metodologia da PI, sendo, respetivamente, 2, 3 e 4 a sua variabilidade de caixas. Às tabelas 7, 8 e 9 correspondem os resultados obtidos usando a metodologia da PI, com o mesmo critério de variabilidade de caixas.

Nestas tabelas, existem casos onde está representado o valor de 1800 a vermelho e outros onde não existe valor, apenas um realce. O primeiro caso significa que o programa não conseguiu obter uma solução válida dentro do tempo estipulado para a otimização, sendo considerado o valor máximo estipulado, 1800 segundos. O segundo caso significa que o algoritmo gerador de caixas, para as condições definidas e com as caixas em estudo, não consegue encontrar uma solução válida.

Tabela 4 – Tempos de otimização sem PI, com 2 caixas diferentes

Caixas	VC70 (s)	VC80 (s)	VC90 (s)
20	4,14	3,65	16,13
30	27,6	32,85	253,5
40	44,99	171,18	1800
50		1800	1800
60			

Tabela 5 – Tempos de otimização sem PI, com 3 caixas diferentes

Caixas	VC70 (s)	VC80 (s)	VC90 (s)
20	4,68	14,58	157,87
30	27,65	176,4	1800
40	34,59	1800	1800
50			1800
60			

Tabela 6 – Tempos de otimização sem PI, com 4 caixas diferentes

Caixas	VC70 (s)	VC80 (s)	VC90 (s)
20	3,35	13,26	82,13
30	37,13	86,04	1800
40		803,14	1800
50			
60			

Tabela 7 – Tempos de otimização PI, com 2 caixas diferentes

Caixas	VC70 (s)	VC80 (s)	VC90 (s)
20	3,94	3,45	4,4
30	7,97	7,07	36,58
40	27,24	97,2	244,48
50	244,63	257,7	261,84
60	358,27	980,88	1800
70	1283,68	1800	1800
80	1800	1800	1800
90	1800	1800	1800

Tabela 8 – Tempos de otimização com PI, com 3 caixas diferentes

Caixas	VC70 (s)	VC80 (s)	VC90 (s)
20	3,65	4,62	5,78
30	8,51	8,28	28,78
40	16,89	112,2	114,88
50	198,89	397,63	499,94
60	754,52	673,83	1774,48
70	1150,07	1800	1800
80	1231,4	1800	1800
90	1800	1800	1800

Tabela 9 – Tempos de otimização com PI, com 4 caixas diferentes

Caixas	VC70 (s)	VC80 (s)	VC90 (s)
20	2,62	4,4	8,22
30	17,1	31,18	67,67
40	18,45	82,52	436,25
50	39,09	86,42	1800
60	231,18	856,15	1800
70	421,42	1800	1800
80		1800	1800
90		1800	1800

Numa primeira análise dos resultados obtidos é possível verificar que nas otimizações, usando a metodologia da PI, é possível testar um maior número de caixas. Isto deve-se ao facto de as caixas desta metodologia serem desenvolvidas com base nas dimensões de uma palete normalizada. Isto faz com que seja possível a existência de uma relação entre as medidas destas, havendo uma melhor otimização. No caso das caixas sem o uso da PI, a compatibilidade entre as caixas é mais reduzida, logo menor é a otimização.

Ao analisar o comportamento de cada tabela, a tendência natural dos resultados é que o tempo de otimização aumenta quando aumenta o número de caixas, bem como quando aumenta percentagem de volume que estas ocupam.

Numa outra análise, entre os métodos com e sem PI, com o mesmo número e a mesma variabilidade de caixas, verifica-se que os tempos de otimização aumentam consideravelmente no caso das otimizações sem a recurso à PI.

A comparação dos dois métodos está traduzida das tabelas 10 à 18, onde se observa que a não utilização da PI implica um aumento significativo do tempo global de otimização. Analisando a variação dos tempos de otimização, constata-se que estes são, em média 68% superiores se não for utilizada esta metodologia.

Tabela 10 – Comparação tempos de otimização 2 caixas VC70

Caixas	Com PI (s)	Sem PI (s)	Variação (%)
20	3,94	4,14	4,83
30	7,97	27,6	71,12
40	27,24	44,99	39,45
50	244,63		
60	358,27		
70	1283,68		
80	1800		
90	1800		

Tabela 11 – Comparação tempos de otimização 2 caixas VC80

Caixas	Com PI (s)	Sem PI (s)	Variação (%)
20	3,45	3,65	5,48
30	7,07	32,85	78,48
40	97,2	171,18	43,22
50	257,7	1800	85,68
60	980,88		
70	1800		
80	1800		
90	1800		

Tabela 12 – Comparação tempos de otimização 2 caixas VC90

Caixas	Com PI (s)	Sem PI (s)	Variação (%)
20	4,4	16,13	72,72
30	36,58	253,5	85,57
40	244,48	1800	86,42
50	261,84	1800	85,45
60	1800		
70	1800		
80	1800		
90	1800		

Tabela 13 – Comparação tempos de otimização 3 caixas VC70

Caixas	Com PI (s)	Sem PI (s)	Variação (%)
20	3,65	4,68	22,01
30	8,51	27,65	69,22
40	16,89	34,59	51,17
50	198,89		
60	754,52		
70	1150,07		
80	1231,4		
90	1800		

Tabela 14 – Comparação tempos de otimização 3 caixas VC80

Caixas	Com PI (s)	Sem PI (s)	Variação (%)
20	4,62	14,58	68,31
30	8,28	176,4	95,31
40	112,2	1800	93,77
50	397,63		
60	673,83		
70	1800		
80	1800		
90	1800		

Tabela 15 – Comparação tempos de otimização 3 caixas VC90

Caixas	Com PI (s)	Sem PI (s)	Variação (%)
20	5,78	157,87	96,34
30	28,78	1800	98,40
40	114,88	1800	93,62
50	499,94	1800	72,23
60	1774,48		
70	1800		
80	1800		
90	1800		

Tabela 16 – Comparação tempos de otimização 4 caixas VC70

Caixas	Com PI (s)	Sem PI (s)	Variação (%)
20	2,62	3,35	21,79
30	17,1	37,13	53,95
40	18,45		
50	39,09		
60	231,18		
70	421,42		
80			
90			

Tabela 17 – Comparação tempos de otimização 4 caixas VC80

Caixas	Com PI (s)	Sem PI (s)	Variação (%)
20	4,4	13,26	66,82
30	31,18	86,04	63,76
40	82,52	803,14	89,73
50	86,42		
60	856,15		
70	1800		
80	1800		
90	1800		

Tabela 18 – Comparação tempos de otimização 4 caixas VC90

Caixas	Com PI (s)	Sem PI (s)	Variação (%)
20	8,22	82,13	89,99
30	67,67	1800	96,24
40	436,25	1800	75,76
50	1800		
60	1800		
70	1800		
80	1800		
90	1800		

Outro parâmetro em análise é influência que a variabilidade das caixas pode ter nas otimizações (tabelas 19 a 24), no qual o comportamento não é uniforme.

Nos casos em que o volume ocupado é de 70% e 80%, verifica-se que o aumento da variabilidade traduz uma redução significativa do tempo de otimização.

Por outro lado, quando se analisa o caso de ocupação de 90% e utilizando a metodologia da PI, o comportamento é diferente, pois existe um aumento do tempo de otimização. Este aumento poderá ser explicado pelas dimensões das caixas que estão em estudo.

Tabela 19 – Tempos de otimização usando PI e VC70

Caixas	2 Caixas (s)	3 Caixas (s)	4 caixas (s)
20	3,94	3,65	2,62
30	7,97	8,51	17,1
40	27,24	16,89	18,45
50	244,63	198,89	39,09
60	358,27	754,52	231,18
70	1283,68	1150,07	421,42
80	1800	1231,4	
90	1800	1800	

Tabela 20 – Tempos de otimização usando PI e VC80

Caixas	2 Caixas (s)	3 Caixas (s)	4 caixas (s)
20	3,45	4,62	4,4
30	7,07	8,28	31,18
40	97,2	112,2	82,52
50	257,7	397,63	86,42
60	980,88	673,83	856,15
70	1800	1800	1800
80	1800	1800	1800
90	1800	1800	1800

Tabela 21 – Tempos de otimização usando PI e VC90

Caixas	2 Caixas (s)	3 Caixas (s)	4 caixas (s)
20	4,4	5,78	8,22
30	36,58	28,78	67,67
40	244,48	114,88	436,25
50	261,84	499,94	1800
60	1800	1774,48	1800
70	1800	1800	1800
80	1800	1800	1800
90	1800	1800	1800

Tabela 22 – Tempos de otimização sem PI e VC70

Caixas	2 Caixas (s)	3 Caixas (s)	4 caixas (s)
20	4,14	4,68	3,35
30	27,6	27,65	37,13
40	44,99	34,59	
50			

Tabela 23 – Tempos de otimização sem PI e VC80

Caixas	2 Caixas (s)	3 Caixas (s)	4 caixas (s)
20	3,65	14,58	13,26
30	32,85	176,4	86,04
40	171,18	1800	803,14
50	1800		
60			

Tabela 24 – Tempos de otimização sem PI e VC90

Caixas	2 Caixas (s)	3 Caixas (s)	4 caixas (s)
20	16,13	157,87	82,13
30	253,5	1800	1800
40	1800	1800	1800
50	1800	1800	
60			

Saliente-se as soluções obtidas nas figuras 8, 9 e 10. Estas imagens são a representação tridimensional das soluções obtidas nas otimizações do modelo. A figura 8 representa a solução que usa a metodologia da PI, com 20 caixas, VC70 e com o uso de 2 caixas diferentes. A figura 9 representa a solução de 20 caixas VC70, com o uso de 2 caixas diferentes e sem o uso da metodologia PI. Por fim, a figura 10 representa a solução de 30 caixas, VC80, com 3 caixas diferentes e fazendo uso da metodologia PI.

Em suma, estas representações gráficas permitem verificar que o modelo apresenta soluções válidas pois estas não apresentam colisões ou caixas fora dos limites do contentor.

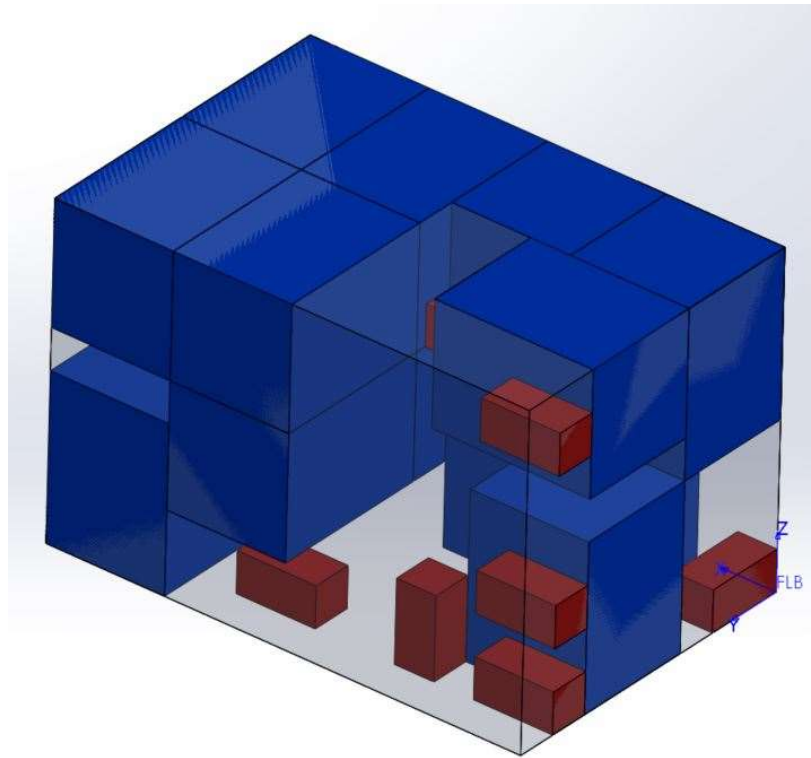


Figura 8 - Modelação com PI com 20 caixas, VC70 e 2 caixas diferentes

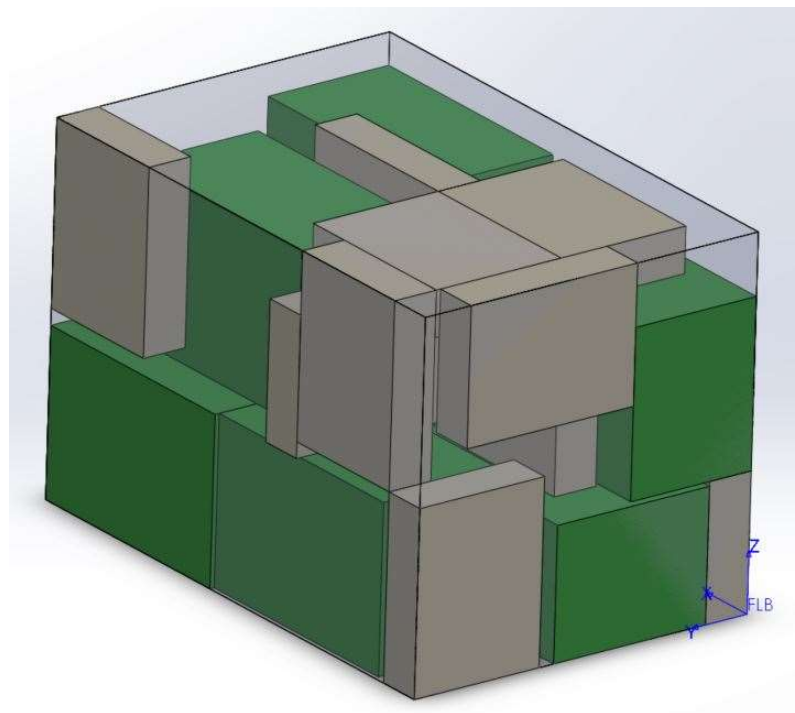


Figura 9 - Modelação sem PI com 20 caixas, VC70 e 2 caixas diferentes

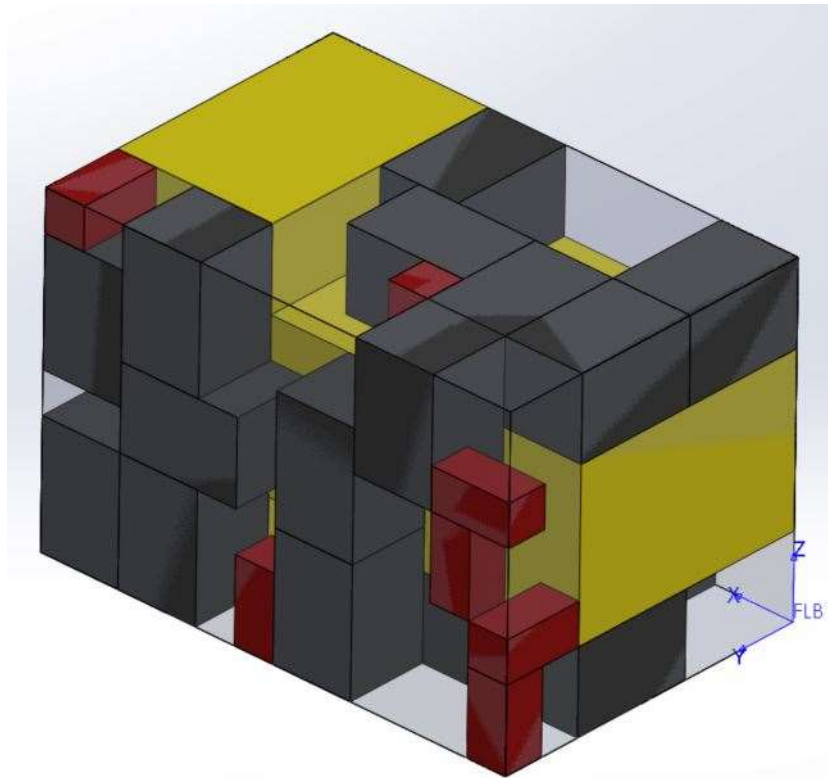


Figura 10 - Modelação com PI com 30 caixas, VC80 e 3 caixas diferentes



# CONCLUSÕES

- 4.1 CONCLUSÕES
- 4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta uma análise aos resultados apresentados no capítulo anterior bem como apresenta algumas propostas de trabalhos futuros.

### 4.1 CONCLUSÕES

Tendo por base o estudo desenvolvido, pode concluir-se que os objetivos propostos foram alcançados.

Certamente, os resultados obtidos permitem observar que a PI tem, de facto, uma particular influencia na resolução dos problemas de CLP.

Note-se que foram observadas reduções de tempo de otimização, em média, na ordem dos 68%, que demonstram que a utilização de caixas padronizadas desenvolvidas pelo projeto *Modulushca* representa um avanço importante no desenvolvimento logístico. Os fatores que poderão estar na origem desta redução são a correlação entre as dimensões das caixas e a correlação destas dimensões com as dimensões de uma palete.

Na questão da variabilidade das caixas, não foi possível definir um padrão uniforme a todas as otimizações. Existe uma tendência de diminuição dos tempos de otimização à medida que aumenta a variabilidade de caixas. Contudo, quando analisamos as tabelas com ocupação de 90% essa tendência não existe. Esta alteração de paradigma poderá estar relacionada com as dimensões de caixas escolhidas, pelo que, não é possível formular uma teoria sobre este tópico.

Em suma, pode-se afirmar que o recurso à PI poderá ser uma mais valia na resolução de problemas de CLP.

## 4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Como propostas de futuros trabalhos, de modo a permitir ter uma visão mais global da influência da PI, este estudo poderá ser alargado a outros modelos de CLP.

Outra proposta seria a de incluir nesta problemática outras restrições, como por exemplo o peso das caixas, a estabilidade e a distribuição do peso dentro da carga.

Por fim, uma outra análise poderia ser a inclusão de todas as caixas formuladas pelo projeto *Modulushca*, de forma a permitir a utilização de outras combinações de caixas. Permitindo assim analisar em pleno a utilização da metodologia da PI e também obter uma conclusão mais “sólida” sobre o impacto da variabilidade das caixas no problema de CLP.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Bischoff, E., & RatCliff, M. (1995). *Issues in the Development of Approaches to Container Loading*.
- Bortfeldt, A., & Wäscher, G. (2013). Constraints in container loading—A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, 229(1), 1–20.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.006>
- Ceniga, P., & Sukalova, V. (2015). *Future of Logistics Management in the Process of Globalization*. 160–166.
- Chen, C. S., Lee, S. M., & Shen, Q. S. (1995). An analytical model for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 80(1), 68–76.  
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00002-T](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00002-T)
- Crainic, T. G., & Montreuil, B. (2016). Physical Internet Enabled Hyperconnected City Logistics. *Transportation Research Procedia*, 12(June 2015), 383–398.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.074>
- Hakimi, D., Montreuil, B., Sarraj, R., Ballot, E., & Pan, S. (2012). *SIMULATING A PHYSICAL INTERNET ENABLED MOBILITY WEB: THE CASE OF MASS DISTRIBUTION IN FRANCE*.
- Landschützer, C., Ehrentraut, F., & Jodin, D. (2014). Modular Boxes for the Physical Internet – Technical Aspects. *Literature Series - Economics and Logistics, June*, 1–27. <https://graz.pure.elsevier.com/de/publications/modular-boxes-for-the-physical-internet-technical-aspects>
- Landschützer, C., Ehrentraut, F., & Jodin, D. (2015). Containers for the Physical Internet: requirements and engineering design related to FMCG logistics. *Logistics Research*, 8, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s12159-015-0126-3>
- Maslarić, M., Nikoličić, S., & Mirčetić, D. (2016). Logistics Response to the Industry 4.0: The Physical Internet. *Open Engineering*, 6(1), 511–517.  
<https://doi.org/10.1515/eng-2016-0073>
- Meller, R., Montreuil, B., Thivierge, C., & Montreuil, Z. (2012). *FUNCTIONAL DESIGN OF PHYSICAL INTERNET FACILITIES : A ROAD-BASED TRANSIT CENTER*.
- Modulushca. (2016). *Modulushca Final Report*.
- Montreuil, B., Ballot, E., & Fontane, F. (2012). An open logistics interconnection model for the physical internet. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 45, Issue 6 PART 1). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00385>
- Montreuil, Benoit. (2011). Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logistics Research*, 3(2–3), 71–87.  
<https://doi.org/10.1007/s12159-011-0045-x>

- Montreuil, Benoit, Meller, R. D., & Ballot, E. (2010). *TOWARDS A PHYSICAL INTERNET : THE IMPACT ON LOGISTICS FACILITIES AND MATERIAL HANDLING SYSTEMS DESIGN AND INNOVATION*.
- Montreuil, Benoit, Rougès, J.-F., Cimon, Y., & Poulin, D. (2012). The Physical Internet and Business Model Innovation. *Technology Innovation Management Review*, 2(6), 32–37. <https://doi.org/10.22215/timreview566>
- Pisinger, D. (2002). Heuristics for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 141(2), 382–392. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00132-7)
- Plastic Containers and Pallets*. (n.d.). Retrieved July 27, 2020, from <https://pdf.directindustry.com/pt/pdf-en/martini-alfredo/plastic-containers-pallets/40857-647143.html#open>
- Ramos, A. G., Oliveira, J. F., & Lopes, M. P. (2016). A physical packing sequence algorithm for the container loading problem with static mechanical equilibrium conditions. *International Transactions in Operational Research*, 23(1–2), 215–238. <https://doi.org/10.1111/itor.12124>
- Silva, E. F., Toffolo, T. A. M., & Wauters, T. (2019). Exact methods for three-dimensional cutting and packing: A comparative study concerning single container problems. *Computers and Operations Research*, 109, 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.04.020>
- Treiblmaier, H., Mirkovski, K., & Lowry, P. B. (2016). Conceptualizing the physical internet: Literature review, implications and directions for future research. *11th CSCMP Annual European Research Seminar*, 1–17.
- Zhang, D., Peng, Y., & Leung, S. C. H. (2012). A heuristic block-loading algorithm based on multi-layer search for the container loading problem. *Computers and Operations Research*, 39(10), 2267–2276. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.10.019>
- Zhao, X., Bennell, J. A., Bektaş, T., & Dowsland, K. (2014). A comparative review of 3D container loading algorithms. *International Transactions in Operational Research*. <https://doi.org/10.1111/itor.12094>

# ANEXOS

- 6.1 ANEXO1
- 6.2 ANEXO2
- 6.3 ANEXO3
- 6.4 ANEXO4
- 6.5 ANEXO5
- 6.6 ANEXO6



## 6 ANEXOS

### 6.1 ANEXO1

Parâmetros de otimização com PI e variabilidade 2 caixas.

20 Caixas, 2 tipos, 70%			
-------------------------	--	--	--

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
7	300	200	200
13	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
3,94	0	71,88

20 Caixas, 2 tipos, 80%			
-------------------------	--	--	--

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
14	200	100	100
6	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
3,45	0	78,65

20 Caixas, 2 tipos, 90%			
-------------------------	--	--	--

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
13	200	100	100
7	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
4,4	0	90,89

## 30 Caixas, 2 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
23	300	200	200
7	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
7,97	0	68,75

## 30 Caixas, 2 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
20	300	200	200
10	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
7,07	0	78,13

## 30 Caixas, 2 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
16	300	200	200
14	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
36,58	0	90,63

## 40 Caixas, 2 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
26	200	100	100
14	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
27,24	0	72,40

## 40 Caixas, 2 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
24	200	100	100
16	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
97,2	0	81,25

## 40 Caixas, 2 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
32	300	200	200
8	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
244,48	0	87,50

## 50 Caixas, 2 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
37	200	100	100
13	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
244,63	0	70,57

## 50 Caixas, 2 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
35	200	100	100
15	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
257,7	0	79,43

## 50 Caixas, 2 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
47	300	200	200
3	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
261,84	0	87,50

## 60 Caixas, 2 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
18	200	100	100
42	300	200	200

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
358,27	0	70,31

## 60 Caixas, 2 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
45	200	100	100
15	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
980,88	0	82,03

## 60 Caixas, 2 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
43	200	100	100
17	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	90,89

## 70 Caixas, 2 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
58	200	100	100
12	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1283,68	0	71,35

## 70 Caixas, 2 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
56	200	100	100
14	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	80,21

## 70 Caixas, 2 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
15	200	100	100
55	300	200	200

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	89,84

## 80 Caixas, 2 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
41	200	100	100
39	300	200	200

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	71,61

## 80 Caixas, 2 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
35	200	100	100
45	300	200	200

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	79,43

## 80 Caixas, 2 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
64	200	100	100
16	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	91,67

## 90 Caixas, 2 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
79	200	100	100
11	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	72,14

## 90 Caixas, 2 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
38	200	100	100
52	300	200	200

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	91,15

## 90 Caixas, 2 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
38	200	100	100
52	300	200	200

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	91,15

## 6.2 ANEXO2

Parâmetros de otimização sem PI e variabilidade 2 caixas.

20 Caixas, 2 tipos, 70%			
-------------------------	--	--	--

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
13	400	300	100
7	535	365	290

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
4,14	0	71,93

20 Caixas, 2 tipos, 80%			
-------------------------	--	--	--

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
14	400	300	100
6	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
3,65	0	81,88

20 Caixas, 2 tipos, 90%			
-------------------------	--	--	--

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
13	400	300	100
7	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
16,13	0	90,31

## 30 Caixas, 2 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
20	400	300	100
10	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
27,6	0	72,07

## 30 Caixas, 2 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
12	400	300	100
18	400	300	220

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
32,85	0	80,63

## 30 Caixas, 2 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
25	400	300	100
5	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
253,5	0	89,06

## 40 Caixas, 2 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
6	325	260	254
34	400	300	100

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
44,99	0	69,89

## 40 Caixas, 2 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
30	400	300	100
10	400	300	220

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
171,18	0	81,25

## 40 Caixas, 2 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
25	400	300	100
15	400	300	220

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	90,63

50 Caixas, 2 tipos, 70%
-------------------------

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

50 Caixas, 2 tipos, 80%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
3	325	260	254
47	400	300	100

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	81,82

50 Caixas, 2 tipos, 90%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
45	400	300	100
5	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	90,72

60 Caixas, 2 tipos, 70%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

60 Caixas, 2 tipos, 80%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

60 Caixas, 2 tipos, 90%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

### 6.3 ANEXO3

Parâmetros de otimização com PI e variabilidade 3 caixas.

20 Caixas, 3 tipos, 70%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
11	200	100	100
4	300	200	200
5	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
3,65	0	71,61

20 Caixas, 3 tipos, 80%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
8	200	100	100
9	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
4,62	0	81,77

20 Caixas, 3 tipos, 90%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
8	300	200	200
9	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
5,78	0	92,19

## 30 Caixas, 3 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
5	200	100	100
15	300	200	200
10	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
8,51	0	71,61

## 30 Caixas, 3 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
8	200	100	100
18	300	200	200
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
8,28	0	80,21

## 30 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
17	200	100	100
7	300	200	200
6	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
28,78	0	90,36

## 40 Caixas, 3 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
18	200	100	100
19	300	200	200
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
16,89	0	71,88

## 40 Caixas, 3 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
10	200	100	100
20	300	200	200
10	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
112,2	0	80,73

## 40 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
13	200	100	100
23	300	200	200
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
114,88	0	89,32

## 50 Caixas, 3 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
29	200	100	100
11	300	200	200
10	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
198,89	0	71,61

## 50 Caixas, 3 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
20	200	100	100
21	300	200	200
9	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
397,63	0	80,21

## 50 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
21	200	100	100
17	300	200	200
12	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
499,94	0	88,28

## 60 Caixas, 3 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
33	200	100	100
15	300	200	200
12	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
754,52	0	88,28

## 60 Caixas, 3 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
52	200	100	100
4	400	300	300
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
673,83	0	82,29

## 60 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
33	200	100	100
15	300	200	200
12	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1774,48	0	88,28

## 70 Caixas, 3 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
55	200	100	100
12	300	200	200
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1150,07	0	70,57

## 70 Caixas, 3 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
56	200	100	100
10	300	200	200
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	80,21

## 70 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
47	200	100	100
19	300	200	200
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	91,93

## 80 Caixas, 3 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
56	200	100	100
18	300	200	200
6	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1231,4	0	70,83

## 80 Caixas, 3 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
66	200	100	100
10	300	200	200
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	82,81

## 80 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
60	200	100	100
6	300	200	200
14	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	90,63

## 90 Caixas, 3 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
70	200	100	100
13	300	200	200
7	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	71,35

## 90 Caixas, 3 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
71	200	100	100
8	300	200	200
11	400	300	300

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	82,55

## 90 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
71	200	100	100
15	300	200	200
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	91,93

## 6.4 ANEXO4

Parâmetros de otimização sem PI e variabilidade 3 caixas.

20 Caixas, 3 tipos, 70%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
5	400	300	100
12	400	300	220
3	535	365	290

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
4,68	0	71,18

20 Caixas, 3 tipos, 80%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
6	325	260	254
9	400	300	100
5	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
14,58	0	80,83

20 Caixas, 3 tipos, 90%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
6	400	300	100
10	440	375	190
4	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
157,87	0	90,20

## 30 Caixas, 3 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
8	325	260	254
16	400	300	100
6	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
27,65	0	71,85

## 30 Caixas, 3 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
6	325	260	254
14	400	300	100
10	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
176,4	0	79,46

## 30 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
17	400	300	100
10	400	300	220
3	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	90,94

## 40 Caixas, 3 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
3	325	260	254
34	400	300	100
3	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
34,59	0	73,76

## 40 Caixas, 3 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
5	325	260	254
30	400	300	100
5	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	81,26

## 40 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
6	325	260	254
26	400	300	100
8	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	90,05

50 Caixas, 3 tipos, 70%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

50 Caixas, 3 tipos, 80%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

50 Caixas, 3 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
4	325	260	254
42	400	300	100
4	400	300	220

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	90,55

60 Caixas, 3 tipos, 70%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

60 Caixas, 3 tipos, 80%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

60 Caixas, 3 tipos, 90%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

## 6.5 ANEXOS

Parâmetros de otimização com PI e variabilidade 4 caixas.

20 Caixas, 4 tipos, 70%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
5	200	100	100
8	300	200	200
4	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
2,62	0	70,05

20 Caixas, 4 tipos, 80%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
5	200	100	100
5	300	200	200
7	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
4,4	0	79,43

20 Caixas, 4 tipos, 90%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
5	200	100	100
6	300	200	200
4	400	300	300
5	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
8,22	0	91,93

## 30 Caixas, 4 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
17	200	100	100
6	300	200	200
4	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
17,1	0	70,05

## 30 Caixas, 4 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
17	200	100	100
5	300	200	200
4	400	300	300
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
31,18	0	80,99

## 30 Caixas, 4 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
13	200	100	100
8	300	200	200
5	400	300	300
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
67,67	0	89,32

## 40 Caixas, 4 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
27	200	100	100
6	300	200	200
4	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
18,45	0	72,66

## 40 Caixas, 4 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
22	200	100	100
10	300	200	200
5	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
82,52	0	82,29

## 40 Caixas, 4 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
23	200	100	100
8	300	200	200
5	400	300	300
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
436,25	0	91,93

## 50 Caixas, 4 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
37	200	100	100
7	300	200	200
3	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
39,09	0	72,14

## 50 Caixas, 4 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
35	200	100	100
7	300	200	200
5	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
86,42	0	80,99

## 50 Caixas, 4 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
31	200	100	100
10	300	200	200
6	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	89,32

## 60 Caixas, 4 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
49	200	100	100
5	300	200	200
3	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
231,18	0	72,14

## 60 Caixas, 4 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
44	200	100	100
9	300	200	200
4	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
856,15	0	81,77

## 60 Caixas, 4 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
37	200	100	100
4	300	200	200
5	400	300	300
4	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	89,32

## 70 Caixas, 4 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
61	200	100	100
3	300	200	200
3	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
421,42	0	72,14

## 70 Caixas, 4 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
56	200	100	100
7	300	200	200
4	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	81,77

## 70 Caixas, 4 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
52	200	100	100
10	300	200	200
5	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	90,10

## 80 Caixas, 4 tipos, 70%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

## 80 Caixas, 4 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
68	200	100	100
5	300	200	200
4	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	0	81,77

## 80 Caixas, 4 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
63	200	100	100
9	300	200	200
5	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	0	91,41

90 Caixas, 4 tipos, 70%
-------------------------

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

90 Caixas, 4 tipos, 80%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
80	200	100	100
3	300	200	200
4	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	0	81,77

90 Caixas, 4 tipos, 90%
-------------------------

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
75	200	100	100
7	300	200	200
5	400	300	300
3	600	400	400

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	0	91,41

## 6.6 ANEXO6

Parâmetros de otimização sem PI e variabilidade 4 caixas.

### 20 Caixas, 4 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
10	400	300	100
4	400	300	220
3	440	375	190
3	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
3,35	0	71,62

### 20 Caixas, 4 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
6	325	260	254
6	400	300	100
4	440	375	190
4	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
13,26	0	82,47

### 20 Caixas, 4 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
3	325	260	254
5	400	300	100
8	440	375	190
4	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
82,13	0	88,85

## 30 Caixas, 4 tipos, 70%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
7	325	260	254
16	400	300	100
3	400	300	220
4	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
37,13	0	71,20

## 30 Caixas, 4 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
5	325	260	254
18	400	300	100
3	400	300	220
4	535	365	290

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
86,04	0	81,91

## 30 Caixas, 4 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
5	325	260	254
16	400	300	100
6	400	300	220
3	600	400	320

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	89,60

## 40 Caixas, 4 tipos, 70%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

## 40 Caixas, 4 tipos, 80%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
4	325	260	254
30	400	300	100
3	400	300	220
3	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
803,14	0	80,61

## 40 Caixas, 4 tipos, 90%

Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
5	325	260	254
25	400	300	100
6	400	300	220
4	440	375	190

Tempo (s)	Gap (%)	% Ocupação
1800	-	89,99

50 Caixas, 4 tipos, 70%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

50 Caixas, 4 tipos, 80%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

50 Caixas, 4 tipos, 90%

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

**60 Caixas, 4 tipos, 70%**

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

**60 Caixas, 4 tipos, 80%**

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.

**60 Caixas, 4 tipos, 90%**

Neste caso, o algoritmo de seleção de caixas não encontrou uma solução.