

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Flexibilidade no desenho das cadeias de abastecimento

Luís Filipe Rodrigues Prado

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Pedro Amorim

Co-orientador: Alexandra Marques

20 de Julho de 2020

Resumo

A cadeia de abastecimento de biomassa é um sistema complexo que lida com várias restrições e parâmetros dinâmicos que variam no horizonte de planeamento e são específicos para sua localização geográfica, sazonalidade de colheita e procura imprevisível. Os fatores anteriormente referidos provocam disrupções no bom funcionamento da cadeia de abastecimento. Sendo assim, a flexibilidade no desenho das cadeias de abastecimento aparece associada ao conceito de risco, permitindo que a mesma consiga se adaptar e lidar com os problemas que surgem. Consequentemente, esta dissertação estuda o desenho de cadeias logísticas e em particular, em que medida a flexibilidade de reconfiguração da cadeia ao longo do tempo pode contribuir para a redução dos custos logísticos globais. Nesta análise são referidas três estratégias de planeamento flexível: a flexibilidade logística, que é caracterizada pela possibilidade de abrir terminais intermédios no desenho da rede de transportes, sendo que estes terminais podem ser abertos e fechados em diferentes períodos do horizonte de planeamento; flexibilidade de processos, que retrata a possibilidade de alocar diferentes equipas e equipamentos a localizações específicas em determinados períodos de tempo; o último nível de flexibilidade trata-se da integração dos últimos dois, permitindo que os terminais intermédios sejam usados para armazenagem e/ou processamento. O problema foi modelado como um *Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment* (MS-mFLP-EA), acompanhado de aspetos essenciais do negócio em questão que surgiram da aplicação do modelo à cadeia de abastecimento de biomassa florestal. Nesta dissertação é realizada uma comparação entre as diferentes dimensões de flexibilidade no planeamento das cadeias de abastecimento, fornecendo posteriormente um importante conjunto de informações relacionadas com o impacto da variação de alguns parâmetros do modelo em determinada estratégia de flexibilidade. De forma a conseguir obter soluções de boa qualidade e com um tempo razoável de computação, foi utilizado um método de solução que consiste numa mateurística baseada numa estrutura *fix-and-optimize* (FO).

Abstract

The biomass supply chain is a complex system that deals with many restrictions and dynamic parameters that vary in the planning horizon and are specific to its geographical location, harvest seasonality and unpredictable demand. The factors mentioned above cause disruptions in the smooth functioning of the supply chain. Therefore, flexibility in the design of supply chains appears associated with the concept of risk, allowing it to adapt and deal with problems that arise. Consequently, this dissertation studies the design of logistics chains and in particular, the extent to which the flexibility of reconfiguring the chain over time can contribute to the reduction of global logistics costs. In this analysis, three flexible planning strategies are mentioned: logistical flexibility, which is characterized by the possibility of opening intermediate terminals in the design of the transport network and these terminals can be opened and closed at different periods of the planning horizon; process flexibility, which portrays the possibility of allocating different teams and equipment to specific locations in certain periods of time; the last level of flexibility is the integration of the last two, allowing the intermediate terminals to be used for storage and / or processing. The problem was modeled as a Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment (MS-mFLP-EA), accompanied by essential aspects of the business in question that emerged from the application of the model to the forest biomass supply chain. In this dissertation, a comparison is made between the different dimensions of flexibility in supply chain planning, subsequently providing an important set of information related to the impact of the variation of some parameters of the model in a given flexibility strategy. In order to obtain good quality solutions and with a reasonable computation time, a solution method was used, which consists of a metaheuristics based on a fix-and-optimize (FO) structure.

Agradecimentos

A trajetória que percorri ao longo do meu percurso académico ficou marcada por diversos desafios, alegrias, companheirismo e entajuda, períodos de incerteza, frustração e trabalho árduo.

Em primeiro lugar quero agradecer a toda a minha família pelo apoio incondicional que sempre me deram, por sempre me terem incentivado a ir mais longe e por todo o carinho que me deram ao longo da vida. Agradeço ao projeto GOTECFOR, ao INESC TEC e à Floresta Jovem, pela aposta em mim, pelo fornecimento de recursos e partilha de informação. Quero também deixar o meu agradecimento a todos os que me ajudaram na elaboração desta dissertação. O caminho percorrido ao longo desta trabalho foi um pouco atípico, tendo sido necessário um esforço extra de todas as partes e quero por isso desde já agradecer. Agradeço ao Prof. Dr. Pedro Amorim por me ter sempre incentivado, por toda a ajuda prestada, pela transmissão de conhecimento e pelo seu rigoroso nível científico. À minha co-orientadora, Dra. Alexandra Marques, deixo o meu sincero agradecimento, pela disponibilidade e apoio que sempre mostrou, pela sua visão crítica e oportuna que tanto me ajudaram na realização deste trabalho. Quero também deixar o meu agradecimento ao Reinaldo Gomes por todas as suas contribuições e pelo apoio incondicional quando as coisas não estavam a correr da melhor forma e ao Ricardo Soares por todas as sugestões pertinentes e por todos os esclarecimentos técnicos.

Quero por isso deixar o meu agradecimento a todos aqueles que contribuíram para o meu sucesso ao longo da vida e que marcaram o meu percurso pessoal e académico até aos dias de hoje.

Obrigado a todos,

Filipe Prado

*“Success is not final,
failure is not fatal:
it is the courage to continue that counts”*

Winston Churchill

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Motivação	4
2	Revisão bibliográfica	5
2.1	Flexibilidade no desenho das cadeias de abastecimento	5
2.2	Utilização de técnicas de Investigação Operacional para modelação da flexibilidade em cadeias de abastecimento	7
2.2.1	<i>Facility Location Problem</i>	7
2.2.2	<i>Multi-level Facility Location Problem</i>	7
2.2.3	<i>Mobile Facility Location Problem</i>	8
2.2.4	<i>Multi-period Facility Location Problem</i>	8
2.2.5	<i>Facility Location Problem with Equipment Assignment</i>	9
2.2.6	<i>Multi-scale Facility Location Problem</i>	9
3	Caso de estudo	11
3.1	Descrição do caso de estudo	11
3.1.1	A cadeia de abastecimento de biomassa florestal	11
3.2	Modelação do caso de estudo	14
4	Desenvolvimento do método de solução	19
4.1	Formulação matemática	19
4.2	Pré-processamento dos dados	24
4.3	<i>Fix-and-optimize</i>	27
5	Experiências computacionais	31
5.1	Solução <i>baseline</i>	31
5.2	Comparação entre as diferentes dimensões de flexibilidade	33
5.3	Questões de gestão	34
5.4	Abordagem pela mateurística - <i>Fix-and-optimize</i>	38
6	Conclusões e trabalho futuro	43
A	Resultados do MIP <i>solver</i>	45

Lista de Figuras

3.1	Fase de processamento da matéria prima em lascas de madeira (Fotografia da Floresta Jovem)	13
3.2	Fase de carga para posterior transporte (Fotografia da Floresta Jovem)	13
3.3	Representação das dimensões de flexibilidade do problema	15
3.4	Representação de um <i>Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment</i> (MS-mFLP-EA) em diferentes períodos do horizonte de planeamento.	16
5.1	Representação do problema: Rede de transporte, alocação de estilhaçadores (máquinas) e equipas, considerando terminais intermédios para processamento e/ou armazenamento	32
5.2	<i>Fix-and-optimize</i> vs MIP <i>solver</i> para a instância I1.	40
5.3	<i>Fix-and-optimize</i> vs MIP <i>solver</i> para a instância I4	41

Lista de Tabelas

4.1	Abordagem com duas escalas de tempo diferentes: juntar as variáveis de decisão estratégicas (macro-períodos) com as variáveis de decisão táticas (micro-períodos)	21
4.2	Criação do index	25
4.3	Geração de arcos	25
5.1	Abordagens às diferentes dimensões de flexibilidade	33
5.2	Dimensões de flexibilidade	34
5.3	Performance das diferentes flexibilidades tendo em conta as instâncias I1 e I3 . .	34
5.4	Influência na solução da variação do custo por hora de trabalho para as abordagens A, D, E e F, tendo em conta as instâncias I1 e I3	35
5.5	Influência da variação do custo de abertura de um terminal para as abordagens D e E, tendo em conta as instâncias I1 e I3	36
5.6	Influência da instância em questão (I1 ou I3) para a abordagem E em relação à abordagem A	36
5.7	Influência coeficiente de dispersão das pilhas para a abordagem F em relação à abordagem A, tendo em conta as instâncias I1 e I3	37
5.8	Influência do número terminais e da sua capacidade para as abordagens D, E e F, tendo em conta a instância I3.	37
5.9	Influência do custo de abertura de um terminal e da taxa de conversão da produtividade ψ em relação aos terminais para as abordagens A, D, E e F e tendo em conta a instância I1 e I3	38
5.10	Parâmetros usados pela abordagem via mateurística	39
5.11	Comparação entre o MIP <i>solver</i> e abordagem pela mateurística para as diferentes instâncias	39
A.1	Resultados do MIP <i>solver</i> para I1. Solução (€) e respetivo <i>GAP</i> (%) em função do custo por hora de trabalho, o custo de abertura de um terminal, o ψ (variação da produtividade das máquinas nas pilhas) e o coeficiente de dispersão das pilhas.	45
A.2	Resultados do MIP <i>solver</i> para I3. Solução (€) e respetivo <i>GAP</i> (%) em função do custo por hora de trabalho, o custo de abertura de um terminal, o ψ (variação da produtividade das máquinas nas pilhas) e o coeficiente de dispersão das pilhas.	46
A.3	Resultados do MIP <i>solver</i> para I3. Solução (€) e respetivo <i>GAP</i> (%) em função do número de terminais, do divisor de capacidade, do custo por hora de trabalho e do ψ (variação da produtividade das máquinas nas pilhas).	47

Abreviaturas e Símbolos

BAU	<i>Business as usual</i>
SCF	<i>Supply Chain Flexibility</i>
FO	<i>Fix-and-Optimize</i>
FLP	<i>Facility Location Problem</i>
INESC TEC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência
MCFLPD	<i>Coverage Facility Location Problem with Drones</i>
mFLP	<i>mobile Facility Location Problem</i>
MIP	<i>Mixed Integer Programming</i>
mIFLP	<i>Multi-level Facility Location Problem</i>
MS-mFLP-EA	<i>Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
SCP	<i>Supply Chain Planning</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Com o progresso da sociedade e o desenvolvimento da economia, os problemas com os recursos e o meio ambiente cada vez se têm tornado mais importantes (Mao, Huang, Chen, & Wang, 2018). O novo quadro europeu de ação relativa ao clima e à energia para 2030 pressupõe que pelo menos 27% de toda a energia consumida deve provir de fontes renováveis de energia, sendo que a biomassa representa uma excelente alternativa aos combustíveis fósseis (Tymoszuk, Mroczek, Kalisz, & Kubiczek, 2019). A biomassa, que é essencialmente matéria derivada de organismos vivos (matéria orgânica de animais e plantas), assim como de resíduos de madeira, cultivo, algas marinhas, entre outras, é uma das fontes de energia renovável mais utilizadas e o seu uso eficiente tem sido motivo de preocupação para todos os países do mundo (Mafakheri & Nasiri, 2014; Mao et al., 2018).

Uma boa estratégia de logística é essencial para que todos os elementos da cadeia de abastecimento operem em harmonia e assegurem assim que todo o sistema funcione da maneira mais eficiente possível. Nos últimos anos, a otimização logística foi reconhecida como uma oportunidade única de crescimento, aumento de lucro e competitividade para as empresas. No que diz respeito à cadeia de abastecimento de biomassa florestal, o preço desta é relativamente baixo e o custo com processos logísticos pode representar entre 30% a 50% do custo final. Para que o uso deste recurso energético seja viável é necessário que a sua cadeia de abastecimento seja eficiente, bem definida e otimizada desde a recolha até ao seu transporte e armazenamento (Audy, D'Amours, & Rönnqvist, 2012; Nunes, Causer, & Ciolkosz, 2020). Sendo assim, o desenho e planeamento das cadeias de abastecimento de biomassa florestal têm sido amplamente estudados de forma a que a cadeia de abastecimento mantenha um fornecimento de energia seguro, aumente a eficiência e simultaneamente reduza os custos (Murele, Zulkafli, Kopanos, Hart, & Hanak, 2020).

Hoje em dia, para ter um produto competitivo no mercado, é fundamental ter uma cadeia de abastecimento capaz de responder à procura do cliente com agilidade e capaz de responder efetivamente a perturbações inesperadas, em conjunto com responsabilidades ambientais e a necessidade de eliminar processos que não acrescentam valor. Para atingir estes objetivos é necessário que

as empresas implementem o conceito de cadeia de abastecimento flexível (Cabral, 2012). O desenvolvimento da flexibilidade da cadeia de abastecimento (SCF) é uma das abordagens adotadas pelas organizações de forma a alcançar elevados níveis de eficiência e resiliência. O SCF representa a capacidade de uma empresa ser ágil, adaptável e responsiva de forma a responder às exigências do mercado, lidando com a incerteza e garantindo o bom fluxo de produtos e serviços através da cadeia de abastecimento (Liu, Zhang, Batista, & Rong, 2019).

O conceito de cadeia de abastecimento flexível adapta-se ao caso da biomassa florestal na medida em que torna esta cadeia mais hábil para responder a situações inesperadas, tais como os incêndios que têm vindo a assolar Portugal nos últimos anos, e que provocam uma baixa considerável na disponibilidade de recursos naturais. Segundo Poggi, Firmino, and Amado (2018), o cenário de alterações climáticas e os efeitos associados que se perspetivam agravados, têm vindo a aumentar o risco de incêndios florestais, em particular nos países do sul da Europa. Sendo assim, torna-se cada vez mais importante aumentar a agilidade e resiliência da cadeia de abastecimento de forma a que esta consiga se adaptar e conseguir manter o bom funcionamento. Além disso, este conceito de flexibilidade permite a diminuição dos custos logísticos, através da criação de terminais intermédios, o que não acarreta custos significativos e permite uma melhor consolidação de cargas, uma utilização das máquinas mais proveitosa e a diminuição dos tempos não produtivos.

Nesta dissertação serão abordados três níveis distintos de flexibilidade. O primeiro nível de flexibilidade é o de logística, que consiste na possibilidade de abrir e fechar terminais intermédios no desenho das redes de transporte. Estes terminais intermédios podem ser abertos e fechados em diferentes períodos do horizonte de planeamento e existe flexibilidade para definir quando, quais, quantos e onde os abrir ou fechar. O segundo nível de flexibilidade está relacionado com a dimensão de processos e operações, mais propriamente com a possibilidade de alocar diferentes equipas e equipamentos em diferentes pilhas, quando o fazer e durante quanto tempo. Por último, o terceiro nível de flexibilidade integra as dimensões de logística e de processamento, definindo quais e quando os terminais abrem e fecham, qual a sua capacidade e permitindo ainda que estes sejam abertos para armazenamento e/ou processamento.

A empresa fornecedora de biomassa que serviu de caso de estudo para a realização desta dissertação decorre de um projeto em investigação no INESC TEC. Esta empresa fornecedora de biomassa, fornece um conjunto de clientes por todo país, sendo que estes têm uma procura muito heterogénea e um comportamento sazonal. Esta empresa também possui um conjunto de possíveis locais (pilhas) onde eles podem recolher e processar os resíduos florestais. O caso aqui em análise é o exemplo perfeito de uma cadeia de abastecimento rígida: recolhem os resíduos florestais, processam esses mesmos resíduos (estilhagem) no mesmo sítio (pilhas) e são também os responsáveis pela entrega da biomassa às centrais.

Esse tipo de abordagem de desenho da rede é um exemplo clássico de um *Facility Location Problem* (FLP) e estava vinculado apenas ao planeamento estratégico, o que limita muito a abordagem a ser adotada. Um FLP é caracterizado por um conjunto de instalações, onde são avaliadas as possibilidades de abrir ou não essas instalações e são definidos os fluxos de material que deixam essas instalações e vão para os clientes. Como é necessário introduzir outro nível neste problema,

o terminal intermédio, o modelo passa a se identificar com um *Multi-level Facility Location Problem* (mlFLP), mais precisamente num *Two-level Facility Location Problem* (mlFLP).

Visto que se pretende incorporar maior flexibilidade na abertura e fecho de terminais intermédios e considerar diferentes tipos de fluxos de material na cadeia, foi considerado um *mobile Facility Location Problem* na construção deste modelo. Porém, problemas relacionados com *workforce allocation* não eram modelados através desta metodologia. Visto que é necessário tomar decisões relacionadas com a alocação de equipamento e equipas nos pontos de recolha e processamento desejados, o *mobile Facility Location Problem* falado anteriormente, teve de ser ajustado para um *mobile Facility Location Problem with equipment assignment*.

Como o equipamento pode ser fixo ou móvel e pode ser alocado a diferentes locais durante o horizonte de planeamento, e tendo em consideração que alguns dos parâmetros são dinâmicos e variam no horizonte de planeamento, como a procura e a disponibilidade de matéria-prima, uma nova variante foi incorporada ao modelo, tornando-se este num *Multi-period mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment*, que já oferece flexibilidade para lidar com condições dinâmicas.

No entanto, as decisões estratégicas e táticas não estavam a ser integradas de forma adequada ao modelo, visto que os períodos de tempo e os horizontes de planeamento em que essas decisões são tomadas são bastante distintos. Foi então assim que surgiu o conceito de *Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment*.

O desenho da rede das cadeias de abastecimento é um problema de otimização para o qual já existem imensos algoritmos de solução, incluindo meta-heurísticas, mateurísticas, heurísticas e métodos exatos. A maior parte destes métodos de solução utiliza pacotes de optimização comerciais como o CPLEX e o GUROBI para resolver os MIP *models*. Porém, quando o número de variáveis discretas é grande, os modelos só podem ser resolvidos usando métodos não exatos, de forma a atingir uma solução próxima da ótima. Como as soluções reais do dia-a-dia envolvem instâncias muito grandes, a sua resolução através de métodos exactos demoraria demasiado tempo, sendo assim necessário implementar um método que apesar de perder na solução ótima consegue gerar esta solução em tempo útil. De forma a conseguir uma solução rápida, viável e que conseguisse incorporar a variante de *workforce allocation* necessária à modelação deste problema surgiu uma mateurística denominada *Fix-and-optimize*, que consegue trabalhar com variáveis binárias, ao contrário do que acontece, por exemplo, na Decomposição de *Benders*.

1.2 Objetivos

Com o objetivo de alcançar um maior conhecimento acerca do sistema logístico nas cadeias de abastecimento de biomassa florestal e acerca da importância do conceito de flexibilidade no seio das mesmas, foi definido um plano de trabalhos com um conjunto de tarefas que começaram com uma revisão bibliográfica de vários estudos já elaborados sobre as cadeias de abastecimento de biomassa, sobre *Supply Chain Flexibility* (SCF) e variantes de *Facility Location Problem* (FLP) com semelhanças ao problema aqui tratado. A revisão bibliográfica efetuada apontou para uma

formulação matemática que se direciona para um *Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment* (MS-mFLP-EA) que é utilizado para resolver o problema tendo em conta as diferentes dimensões de flexibilidade da cadeia de abastecimento. De seguida, esta formulação será aplicada a um caso de estudo relacionado com a cadeia de abastecimento de biomassa florestal em Portugal e por fim serão tiradas conclusões comparando os resultados obtidos com as diversas dimensões de flexibilidade. Uma vez que se está a lidar com instâncias de grande dimensão é necessário o desenvolvimento de um método de solução através da implementação de um método heurístico que permita obter resultados de forma eficiente. Este modelo visa também obter resultados importantes para este tipo de negócio, ou seja, dar resposta a questões importantes para a empresa através da variação de parâmetros do modelo que sejam relevantes para o seu caso.

1.3 Motivação

Esta dissertação insere-se em projetos de investigação em curso no INESC TEC relacionados com o desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão para gestão das cadeias de abastecimento de biomassa florestal. Além do interesse no âmbito das cadeias de abastecimento de biomassa florestal, este estudo poderá também ter um grande potencial para ser generalizado a outras indústrias nas quais possa ser implementado o conceito de flexibilidade da cadeia de logística através da inserção de terminais intermédios móveis. Esta abordagem avalia a possibilidade de abrir, sem custos significativos de investimento, terminais intermédios nos quais é possível armazenar e/ou processar material, melhorando a consolidação de cargas e permitindo a instalação de equipamentos fixos com uma produtividade maior.

As principais contribuições deste trabalho estão relacionadas com a modelagem do problema, na qual diferentes variantes de um *Facility Location Problem* (FLP) foram incorporadas, permitindo assim responder à complexidade da cadeia de abastecimento. Por outro lado, também foram integradas decisões táticas e estratégicas num FLP, sendo que na literatura normalmente apenas se referem acerca das decisões estratégicas. Além destas contribuições, é também apresentado um método de solução para responder a instâncias maiores e foram obtidos resultados que permitem responder a algumas questões de gestão.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Na literatura referente a *Supply Chain Management*, os termos *transformation agility*, *flexible network integration* e *global optimization* são novas tendências e oportunidades de pesquisa relevantes para a investigação operacional, despoletadas pela constante mudança das condições para a implementação das atividades da cadeia de abastecimento (Grazia Speranza, 2018). Neste estudo é explorado o conceito de flexibilidade das cadeias de abastecimento e é avaliado o seu papel no desempenho de uma empresa, sendo que este está relacionado com a capacidade de tornar uma cadeia de abastecimento mais ágil e resiliente.

2.1 Flexibilidade no desenho das cadeias de abastecimento

O risco, em geral, pode ser referido como eventos potenciais associados a consequências desfavoráveis. Dependendo da natureza da indústria, a perceção do risco pode variar. A cadeia de valor da biomassa está associada a seis fatores de risco, incluindo risco regulatório, risco financeiro, risco tecnológico, cadeia de abastecimento e risco de matéria-prima, risco comercial e risco social e ambiental. A insegurança e as flutuações relacionadas a preços de mercado, concorrência no mercado, clima económico e situações comerciais são alguns dos exemplos que contribuíram para altos riscos nos negócios. Por outro lado, os riscos sociais e ambientais cobrem a incerteza na aceitação social do projeto e suas correspondentes questões ambientais. Desta forma, o conceito de gestão de risco é necessário e inevitável (Ngan et al., 2020). Devido a todos os riscos mencionados anteriormente, a melhoria da flexibilidade é um dos principais problemas que tem assolado os gestores industriais e a sua importância tem crescido (Upton, 1994). A flexibilidade pode ser definida como a habilidade para se mudar ou adaptar com pouca penalização em termos de tempo, custo, esforço e desempenho (Upton, 1994). Sendo assim, uma maior flexibilidade nas operações industriais é sinónimo de uma maior habilidade em satisfazer as necessidades do cliente e em responder de forma competitiva em momentos de maior pressão, uma maior capacidade de se preparar para acontecimentos inesperados, responder a perturbações e recuperar destas de forma a manter o nível desejado e além disso, de estar mais próximo daquilo que o mercado precisa (Ponomarov & Holcomb, 2009; Slack, 2005). Na literatura é por diversas vezes referido que a implementação

de conceitos como agilidade e flexibilidade são dos componentes mais relevantes na gestão de risco de disrupção (Shekarian, Reza Nooraie, & Parast, 2019). Existem diversas revisões de literatura que apresentam diversas dimensões de flexibilidade (Christopher & Peck, 2004; Stevenson & Spring, 2007; Tang & Tomlin, 2008) sendo que diferentes tipos de flexibilidade são mais importantes em certos ambientes do que em outros (Slack, 2005). A análise da flexibilidade desta cadeia de abastecimento de biomassa florestal tem em conta os componentes desta e as relações entre eles, de forma a avaliar o impacto no sistema todo (Sanchez & Perez, 2005). Neste problema foram tidas em conta duas dimensões principais da flexibilidade: a flexibilidade logística e a flexibilidade de processos. A primeira dimensão da flexibilidade pode ser modelada como um *Facility Location Problem* (FLP), que incorpora muitas das variantes relacionadas com as características deste problema. A segunda dimensão aparece, em alguns estudos, como um problema de *workforce allocation*. Existem alguns trabalhos na literatura que envolvem flexibilidade logística (Akhtari, Sowlati, & Griess, 2018; Bashiri, Badri, & Talebi, 2012; Goetschalckx, Vidal, & Dogan, 2002; Raghavan, Sahin, & Salman, 2019; Salema, Barbosa-Povoa, & Novais, 2010; Yang, Chen, Chu, & Wang, 2019) e também flexibilidade de processos (Bouchard, D'Amours, Rönnqvist, Azouzi, & Gunn, 2017; Chauhan, Unnikrishnan, & Figliozzi, 2019; Lin, Rodríguez, Shastri, Hansen, & Ting, 2014; Robert et al., 2018), porém não foi encontrado nenhum que incorporasse as duas dimensões de flexibilidade. O tipo de problema que se aproxima mais do aqui posto em causa é o FLP sendo que este é normalmente usado no planeamento das cadeias de abastecimento, adotando diferentes variantes conforme o tipo de planeamento que queremos estudar. O objectivo de um FLP é atingir um equilíbrio entre os custos de instalação da primeira fase e os custos de serviço e transporte da segunda fase (Rohaninejad, Sahraeian, & Tavakkoli-Moghaddam, 2018). Neste problema é avaliada a possibilidade de abrir e fechar terminais intermédios que terão uma função de armazenamento no primeiro nível de flexibilidade. O segundo nível de flexibilidade (flexibilidade logística), trata-se de uma variante de alocação de equipamento, sendo que nesta aproximação tem de se alocar uma equipa e uma máquina numa determinada pilha, seguindo um modelo semelhante ao *Maximum Coverage Facility Location Problem with Drones* (MCFLPD) (Chauhan et al., 2019). Além das variantes referidas anteriormente, existem mais duas relacionadas com a divisão do horizonte de planeamento em diferentes períodos. A primeira variante é o facto de o problema ser multi-período, ou seja, permite a abertura e o fecho de instalações. A outra variante é o facto de este problema ser multi-escala, o que se caracteriza pela divisão do horizonte de planeamento em diferentes níveis de períodos, ou seja, em períodos mais pequenos, dias ou semanas, para um planeamento tático e períodos mais longos, meses e anos, para um planeamento estratégico. Tendo em conta todas as características vistas anteriormente, este problema pode ser modelado como um *Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment* (MS-mFLP-EA), tendo sido adotada uma variante de mobilidade (Raghavan et al., 2019).

2.2 Utilização de técnicas de Investigação Operacional para modelação da flexibilidade em cadeias de abastecimento

2.2.1 Facility Location Problem

Facility Location é um tipo de problema com muito valor na investigação operacional. Possui uma ampla gama de aplicações importantes em muitos campos da modernização, tanto na indústria, como nos transportes, redes, alocação de recursos e muitos outros. Falando informalmente, um *Facility Location Problem* (FLP) trata-se de escolher um conjunto de instalações, como fábricas, armazéns, antenas *wireless*, de forma a minimizar o custo total da abertura de localizações e a atender a procura de determinados bens ou serviços. (Wang, Zhang, Wu, Xu, & Zhang, 2020). Ao resolver este tipo de problemas tem de ser encontrado um equilíbrio entre os custos fixos de alocação e os custos variáveis de transporte (Sauvey, Melo, & Correia, 2020). Nos modelos clássicos de *Facility Location Problem*, é assumido que o cliente consegue sempre o serviço que pretende de determinada instalação e que essa instalação está sempre disponível. Estas suposições podem não ser válidas em muitas situações reais (Rohaninejad et al., 2018). Na literatura, uma grande variedade de modelos de *Facility Location Problem* tem vindo a ser proposta. Além disso, outros problemas como análise de *cluster* e gestão de portfólios também podem ser modelados como *Facility Location Problem* (Dupont, 2008). Este modelo inclui algumas dessas variações de *Facility Location Problem* que têm vindo a aparecer ao longo dos anos: *Capacitated Facility Location Problem*, multi-período, multi-nível (Akhtari et al., 2018; Bashiri et al., 2012; Chauhan et al., 2019; Lin et al., 2014; Ortiz-Astorquiza, Contreras, & Laporte, 2018; Raghavan et al., 2019; Yang et al., 2019), e mFLP (mobile Facility Location Problem) (Halper, Raghavan, & Sahin, 2015).

2.2.2 Multi-level Facility Location Problem

Muitos sistemas de transporte e telecomunicações em larga escala têm uma estrutura hierárquica e organizada em diferentes níveis de instalações responsáveis por fornecer bens ou serviços a clientes espalhados por uma vasta área geográfica (de Oliveira, Contreras, de Camargo, & de Miranda Júnior, 2020). Por isso, uma subclasse dos FLP chamada *Multi-level Facility Location Problem* (mFLP) tem atraído cada vez mais atenções nos últimos anos. Nestes problemas é dado um conjunto de clientes que têm um serviço e um conjunto de potenciais instalações divididas em k níveis. Sendo assim, tem de se determinar que instalações abrem ao mesmo tempo em cada nível, de forma a que os clientes estejam atribuídos a uma ou mais instalações, e tudo isto enquanto se otimiza uma função objetivo. Aplicações deste tipo de problemas surgem naturalmente no *Supply Chain Management* (SCM), onde as interações entre os armazéns, centros de distribuição e outras instalações do género desempenham o papel mais importante (Ortiz-Astorquiza et al., 2018). Este modelo segue uma estrutura de FLP com dois níveis. A singularidade destes *Facility Location Problem* com dois níveis é que nestes modelos os produtos são enviados da produção para os armazéns e a seguir dos armazéns para o cliente final. Sendo assim, a decisão a tomar

passa por definir os locais da produção e dos armazéns e determinar as quantidades de diferentes produtos a ser enviada para cada armazém e de cada um destes para o cliente final (Darvish, Archetti, Coelho, & Speranza, 2019; Hinojosa, Puerto, & Fernández, 2000). Sendo assim, instalações de primeiro nível são normalmente geradoras de recursos, enquanto que as instalações de segundo nível funcionam como intermediários no transporte do produto (de Oliveira et al., 2020).

2.2.3 *Mobile Facility Location Problem*

Um *Mobile Facility Location Problem* é definido numa rede onde clientes e instalações são inicialmente colocados nos vértices. Devem ser definidos vértices de destino para cada cliente e para cada instalação de forma a que cada cliente partilhe um destino com pelo menos uma instalação. Associado a cada cliente está uma procura e cada instalação tem uma capacidade disponível para atender a essa procura. Um vértice de destino deve ser determinado para cada instalação e cada cliente deve ser designado para uma das instalações de forma a que a procura total dos clientes respeite a capacidade máxima. O objetivo é minimizar a distância percorrida pela instalações e pelos clientes (Halper et al., 2015). Considerando o seguinte cenário. Existe uma empresa com algumas fábricas. Existem também várias lojas retalhistas (com procuras diferentes) e para as quais os produtos têm de ser enviados, sendo que estamos interessados em minimizar o custo de transporte. Uma possibilidade é enviar os produtos para cada loja retalhista a partir da fábrica mais próxima. Outra possibilidade é montar um centro de distribuição para cada fábrica (talvez até noutro lugar), enviar os produtos da fábrica para o centro de distribuição (em remessas) e, de seguida, enviar para cada retalhista os produtos do centro de distribuição mais próxima. Desta forma, economiza-se nos custos de transporte pois aproxima-se o centro de distribuição do conjuntos de lojas retalhistas que este está a atender e consegue-se combinar as encomendas enviadas pelas fábricas em grandes remessas, havendo assim uma maior consolidação de cargas (Friggstad & Salavatipour, 2011). Esta é praticamente a situação que é analisada neste modelo porém com umas pequenas nuances. Sendo assim foi adotada a variante de *Mobile Facility Location Problem* visto que existia uma necessidade de ter uma maior flexibilidade na escolha das pilhas a explorar e na escolha de quais terminais intermédios a abrir, quando abrir e também quando os fechar. Além disso, também existe a possibilidade de usar os terminais intermédios apenas para armazenamento e/ou processamento da matéria prima.

2.2.4 *Multi-period Facility Location Problem*

Nos *Multi-period Facility Location Problem*, o objetivo é determinar a distribuição espacial das instalações em cada período de tempo de um horizonte de planeamento finito, de forma a minimizar os custos fixos e variáveis totais para atender à procura dos clientes ao longo do tempo (Correia & Melo, 2017). A mudança das condições de mercado e de negócio em conjunto com a crescente pressão de redução de custos e cumprimento de requisitos de serviço, obriga as empresas a reestruturar a sua rede de instalações. Com esse intuito, a configuração da rede pode mudar ao

longo de um horizonte temporal, abrindo novas instalações e fechando outras inicialmente existentes (Correia & Melo, 2016). As capacidades das plantas e armazéns, bem como a procura e o custos de transporte, mudam ao longo do tempo sendo assim interessante a abertura de novas instalações e o fecho das existentes (Hinojosa et al., 2000). Esta variante é acoplada a este modelo na medida em que é ela que dá a possibilidade e a flexibilidade de abrir e fechar terminais intermédios ao longo do horizonte de planeamento.

2.2.5 Facility Location Problem with Equipment Assignment

O planeamento da cadeia de abastecimento, que se preocupa com a integração e a coordenação de atividades que vão desde a coleta de matérias primas à distribuição do produto final aos clientes, é essencial para aumentar a produtividade e o lucro. Este planeamento é dividido em três níveis: estratégico, tático e operacional. O plano estratégico determina os requisitos de recursos, como o número, localização e capacidade das instalações e armazéns, bem como o fluxo de material através da rede estratégica, enquanto que os planos de nível tático e operacional preocupam-se com o uso eficiente dos recursos. Na literatura, vários modelos de cada um destes níveis são encontrados separadamente porém, é difícil encontrar exemplos que assumam a integração de diferentes níveis de planeamento (Akhtari et al., 2018).

O modelo MIP aqui desenvolvido tem alguns aspetos em comum com o *Maximum Coverage Facility Location Problem with Drones* (MCFLPD) (Chauhan et al., 2019). O modelo desenvolvido em Chauhan et al. (2019) compreende o seguinte:

- i Seleção de um número pré-especificado de instalações capacitadas de uma lista de potenciais locais de lançamento de drones;
- ii Distribuição de um número limitado de drones para as instalações selecionadas;
- iii Atribuição de pontos de procura para abrir instalações, respeitando a capacidade das instalações e as restrições de alcance dos drones.

Este modelo permite a seleção dos melhores locais para a recolha de matéria prima e a instalação de terminais intermédios, com a finalidade de conseguir atender à procura dos clientes distribuídos espacialmente. Além disto, também permite distribuir um número limitado de máquinas para os locais selecionados, respeitando sempre a capacidade da instalação e as restrições das máquinas. Todas estas decisões são tomadas de acordo com períodos definidos, bem como alguns parâmetros dinâmicos (variam ao longo do horizonte de planeamento), tais como a disponibilidade de material nas pilhas e a procura.

2.2.6 Multi-scale Facility Location Problem

Esta abordagem junta as decisões de planeamento táticas e estratégicas num modelo monolítico, o que significa que este modelo considera diferentes granularidades no horizonte de planeamento e precisa assim de assumir um conceito multi-escala que integra multi-períodos com

diferentes dimensões de tempo. Na literatura existem alguns exemplos de modelos que utilizam este conceito de multi-escala (Akhtari et al., 2018; Bashiri et al., 2012; Bouchard et al., 2017; Salema et al., 2010).

A integração das decisões táticas e estratégicas está relacionada com as decisões de abrir terminais intermédios, por quanto tempo, e além disso todas as outras variáveis de decisão resultantes, tais como *stocks* de material, fluxos e alocação de equipamento. É por esta razão que este tipo de modelo é chamado de *Multi-Scale Mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment* (MS-mFLP-EA). Na literatura existem alguns exemplos de modelos que integram dois níveis de decisão e dois horizontes de planeamento diferentes (Akhtari et al., 2018; Bashiri et al., 2012; Salema et al., 2010).

Capítulo 3

Caso de estudo

3.1 Descrição do caso de estudo

3.1.1 A cadeia de abastecimento de biomassa florestal

O caso de estudo que motivou esta dissertação é caracterizado por uma empresa fornecedora de biomassa, que opera em todo o país, possui um conjunto de equipas, um conjunto de equipamentos heterogêneos, um conjunto de clientes com uma procura muito heterogênea e que tem um comportamento sazonal e também possui um conjunto de possíveis locais (pilhas) onde eles podem recolher e processar os resíduos florestais.

A cadeia de abastecimento de biomassa florestal é tipicamente caracterizada por um conjunto de clientes (centrais de bioenergia) que têm uma certa procura que deve ser atendida através da quantidade de resíduos florestais disponíveis em cada pilha, sendo que existe uma grande sazonalidade na disponibilidade de matéria prima. Normalmente, estas cadeias são estudadas desde a colheita até à entrega. Às vezes, as operações de colheita são omitidas, porém as características deste processo podem afectar drasticamente o desempenho a jusante. Em geral, os três processos mais comuns da cadeia de abastecimento de biomassa florestal são as operações de colheita, transporte e armazenamento (Nunes et al., 2020).

3.1.1.1 Colheita

A colheita de biomassa pode ser primária, produzir matéria prima com o intuito final de que o produto seja realmente a biomassa, ou então uma colheita secundária, ou seja, de resíduos ou desperdícios. Geralmente é realizada em florestas, campos agrícolas ou serrações. A biomassa florestal é coletada na forma de troncos, achas ou lascas. A maioria dos tipos de biomassa, seja proveniente quer da agricultura quer da floresta, é caracterizada pela sua disponibilidade sazonal. O intervalo de tempo em que a biomassa está disponível é muito restrito e é determinado pelo período de colheita, condições climáticas e pela necessidade de replantio dos campos e florestas. O período de tempo limitado para coletar uma grande quantidade de biomassa também leva a uma necessidade sazonal significativa de recursos, equipamentos e força de trabalho, sendo que

essa procura sazonal pode aumentar o custo de obtenção desses recursos. Portanto, é necessário armazenar grandes quantidades de biomassa por um período significativo de tempo para que o usuário final opere durante o ano (Nunes et al., 2020).

3.1.1.2 Transporte

O transporte rodoviário é o meio de transporte mais comum usado no transporte de biomassa florestal. Os fatores que favorecem o uso do transporte rodoviário incluem:

- i Distâncias curtas geralmente usadas na indústria de biomassa;
- ii O transporte rodoviário pode oferecer maior flexibilidade em comparação com outros modos. Meios de transporte como o mar ou ferroviário podem ser considerados quando a distância de transporte da biomassa é longa;

Os custos de transporte variam de acordo com a distância e o tempo de transporte. A distância de transporte afeta principalmente o consumo de combustível dos veículos e o tempo de viagem afeta principalmente a proporção de depreciação, seguro, manutenção e trabalho alocado para a mesma viagem. O tempo de viagem inclui o tempo de viagem e retorno, bem como o tempo de espera entre cargas e descargas. Os custos de transporte rodoviário compreendem dois sub-componentes, o custo do caminhão e o custo do combustível. O custo dos componentes do caminhão inclui custos de manutenção, licenças, seguro e os custos com o motorista. Devido à baixa densidade dos tipos de biomassa, a capacidade dos veículos de transporte costuma ser limitada em volume, em vez de em carga. Como resultado, geralmente há uma necessidade crescente de equipamentos de transporte e processamento, além de espaço de armazenamento. A baixa densidade de biomassa aumenta o custo de colheita, processamento (Figura 3.1), transporte (Figura 3.2) e armazenamento ao longo da cadeia de abastecimento, tornando a sua gestão um processo crítico. Portanto, melhorias na eficiência do transporte são uma estratégia para melhorar a eficiência geral (Nunes et al., 2020).



Figura 3.1: Fase de processamento da matéria prima em lascas de madeira (Fotografia da Floresta Jovem)



Figura 3.2: Fase de carga para posterior transporte (Fotografia da Floresta Jovem)

3.1.1.3 Armazenamento

A fase de armazenamento de biomassa é um componente crítico da cadeia logística. Existem várias opções em relação ao armazenamento que podem ser categorizadas como armazéns cobertos ou ao ar livre. Na maioria dos casos, são escolhidas soluções que minimizam o custo de armazenamento, sem analisar o efeito geral na cadeia de abastecimento. Muitos investigadores assumem que um armazenamento coberto usando silos para biomassa é a melhor opção. O armazenamento ao ar livre tem a vantagem de ter um custo mais baixo, mas, por outro lado, a perda de material de biomassa é significativa e o teor de humidade do mesmo não pode ser controlado e reduzido aos níveis desejados, levando a problemas de qualidade. Além disso, também existem problemas de saúde e segurança, como o risco de formação de fungos e esporos e ignição espontânea devido à degradação microbiana exotérmica. Por outro lado, o armazenamento ao ar livre pode ser viável em locais áridos. Na literatura são também considerados alguns casos em que são utilizados locais de armazenamento intermédios entre os pontos de recolha e as centrais de bioenergia. Estas instalações intermédias de armazenamento podem estar localizadas nas proximidades do local de recolha, isto é, nos campos e florestas, mas também perto das estradas. Quando o uso do armazenamento intermediário pode ser modelado, o transporte pode ocorrer em duas etapas, primeiro dos campos / florestas / indústrias madeireiras até um armazém intermédio e depois do armazém para central. Além disso, etapas de processamento também podem ser adicionadas ao local de armazenamento intermédio de forma a reduzir os custos de armazenamento e os custos de transporte secundários (Nunes et al., 2020).

3.2 Modelação do caso de estudo

O objetivo deste modelo é minimizar os custos de transporte e operações, garantindo que toda a procura é atendida. Existem algumas condições relativas a este problema em específico a ter em conta ao integrar ambos os níveis de flexibilidade. As máquinas como têm pouca mobilidade e são mais largas dificulta a sua deslocação para os *supply nodes*, sendo que por isso é considerado que a sua produtividade nos *supply nodes* é inferior à sua produtividade nos *intermediate nodes*. Nestes *supply nodes* mais pequenos perde-se imenso tempo a preparar as máquinas para processar uma quantidade pequena, sendo que por vezes a quantidade processada não é suficiente para encher o camião.

Este planeamento da cadeia de abastecimento pode ser modelado como um *Facility Location Problem* (FLP) com dois níveis: *supply nodes* e *intermediate nodes*, sendo que foi adotada a variante de *mobile Facility Location Problem* (mFLP), o qual é caracterizado por ser flexível na seleção dos *supply nodes* e dos *intermediate nodes* a serem explorados, bem como na função que os *intermediate nodes* irão ter. Outra variante a ser incorporada neste FLP está relacionada com a atribuição dos equipamentos e equipas. Dada esta estrutura flexível, o problema pode ser modelado como um *Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment* (MS-mFLP-EA).

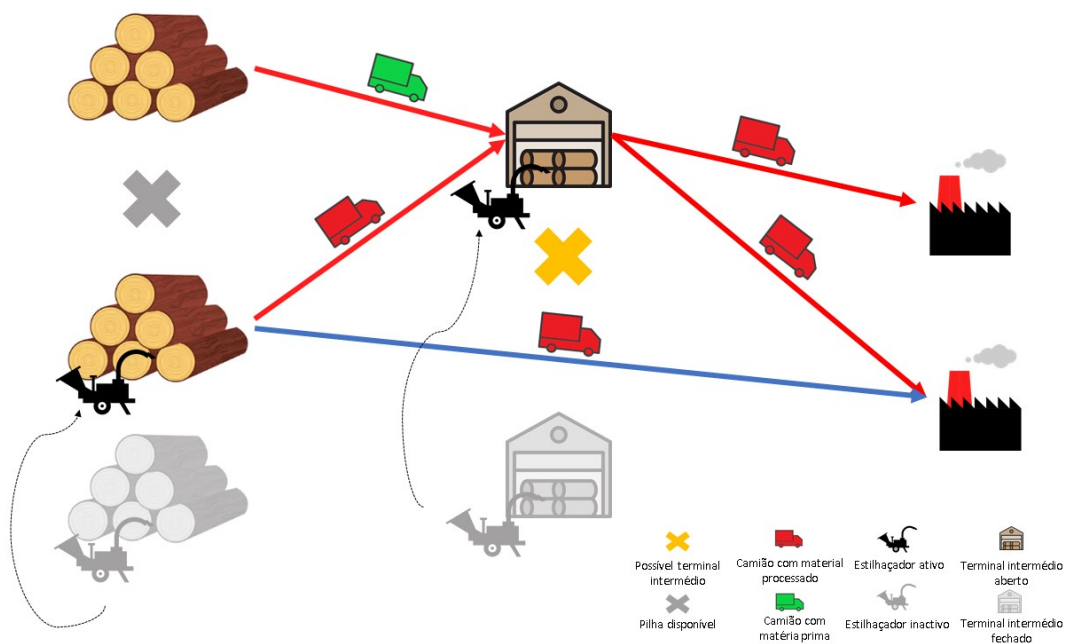


Figura 3.3: Representação das dimensões de flexibilidade do problema

Na Figura 3.3 é possível observar a mudança de pilha (*supply node*) ou terminal intermédio (*intermediate node*) ao qual as máquinas podem estar alocadas, a abertura e fecho de *intermediate nodes* ao longo do horizonte de planeamento e a variação do uso de pilhas (*supply nodes*) ao longo deste mesmo horizonte.

Neste problema, a variante multi-escala engloba duas escalas de tempo que permitem a integração de decisões estratégicas (rede de transporte) e táticas (alocação de equipas e máquinas) num modelo monolítico. A decisão de abrir um novo terminal intermédio aplica-se no âmbito do planeamento estratégico, enquanto que a decisão diária de alocar cada equipa e equipamento faz parte do planeamento tático. Na figura 3.4, encontra-se um exemplo da variação da estrutura da cadeia de abastecimento em diferentes períodos do horizonte de planeamento.

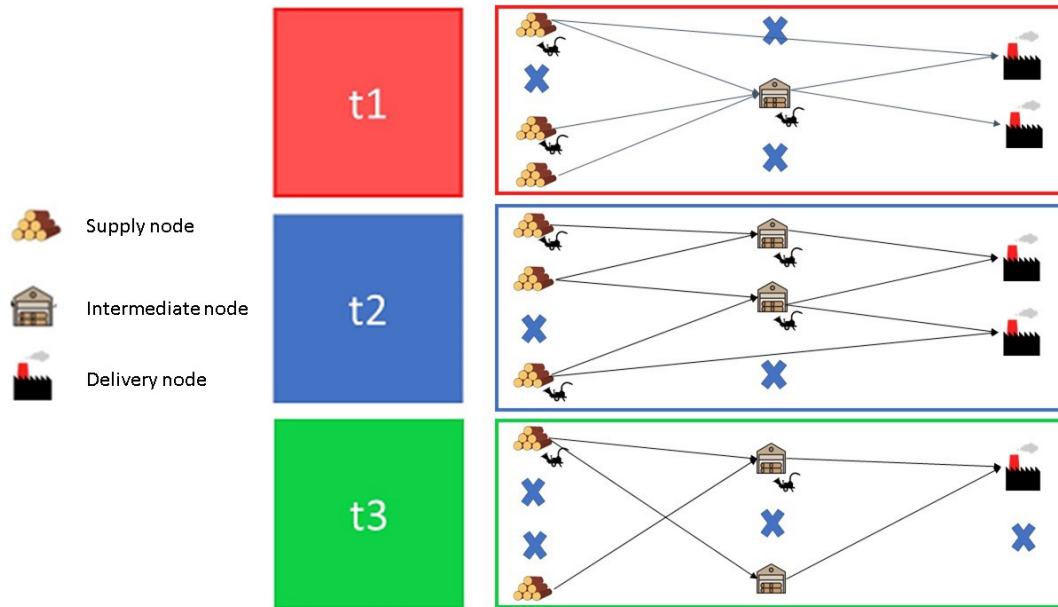


Figura 3.4: Representação de um *Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment* (MS-mFLP-EA) em diferentes períodos do horizonte de planeamento.

A variante de *Multi-Scale Facility Location Problem with Equipment Assignment* (MS-mFLP-EA) permite que o modelo tenha variáveis de decisão com diferentes horizontes de planeamento, dando ao fornecedor de biomassa um plano com decisões de alocação definidas em micro-períodos e decisões relacionadas com a abertura de *intermediate nodes* definidas em macro-períodos. Macro-períodos estão associados ao planeamento estratégico e cada um destes períodos de tempo estão definidos de entre uma semana a um mês, sendo que o horizonte de planeamento é de um ano. Os micro-períodos estão associados a decisões táticas e cada um desses tempos é definido como um dia de trabalho de uma determinada semana ou mês, sendo 1 um micro-período de um dado macro-período t . Na Figura 3.4, é possível observar a variação da localização de cada máquina ao longo dos micro-períodos. É possível ainda verificar a abertura de *intermediate nodes* e a variação da disponibilidade de matéria prima nos *supply nodes*, sendo que a variação da procura por parte dos *delivery nodes* apenas varia ao longo dos macro-períodos. Existem dois tipos de material armazenado: material ainda não processado, que consiste em resíduos ainda não processados, que foram recolhidos nos *supply nodes* e transportados diretamente para os *intermediate nodes*, e o material já processado que pode ter sido processado nos *supply nodes* e transportado para os *intermediate nodes* ou então que pode ter sido processado nos *intermediate nodes* mas ainda não foi transportado para os *delivery nodes*. Isto permite melhores respostas em termos de transporte e uma melhor consolidação de cargas, na medida em que é possível armazenar material por diferentes períodos de tempo e apenas começar o processo quando existe material suficiente para ser rentável.

A solução deste problema segue a modelagem de um problema clássico de *Facility Location*

Problem, no qual a variante de mobilidade foi adicionada, o que permite maior flexibilidade no modelo na escolha de locais para processamento e armazenamento. A variante multi-período foi incorporada com mobilidade, de forma a permitir abrir e fechar locais no horizonte de planeamento. Estas variantes adicionam mais um índice à modelagem clássica de problemas, o período $[t]$, nas variáveis de decisão e nos parâmetros dinâmicos.

A componente de *equipment assignment* que é responsável pelo *workforce allocation* adiciona duas variáveis de decisão, uma para a alocação de máquinas e outra que fornece o número de horas de trabalho de cada máquina. Os conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições dessa modelação são apresentados na próxima secção, onde é fornecida uma descrição detalhada da formulação matemática usada para modelar esse problema como uma programação inteira mista (MIP).

A conservação do fluxo nos *intermediate nodes* foi considerada para que fosse possível garantir a continuidade do processamento ao longo dos períodos de tempo, de forma a conseguir a integração de problemas de *stock* nos *intermediate nodes*, quando eles servem como localizações de armazenamento, permitindo assim a flexibilidade de armazenar material processado e não processado e ainda possibilitando o processamento de matéria-prima que foi armazenada em períodos anteriores. Existem dois tipos de *stock*, o *stock* de material não processado, que são resíduos florestais recolhidos nos *supply nodes*, transportados diretamente para os *intermediate nodes* e que ainda não foram processados, e o *stock* de material processado, que tem duas origens possíveis. Pode ter sido processado nos *supply nodes* e transportado para os *intermediate nodes* para armazenamento, ou pode ter sido processado nos *intermediate nodes*, mas ainda não foi transportado para nenhum *delivery node*. As variáveis de decisão associadas ao *stock*, bem como as restrições específicas deste componente do problema estão descritas na secção 4.1.

Capítulo 4

Desenvolvimento do método de solução

4.1 Formulação matemática

Nesta secção será apresentada a formulação matemática do problema, sendo que inicialmente serão apresentados os conjuntos e os parâmetros, sendo que por último serão apresentadas as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições do modelo.

Alguns dos parâmetros usados nesta modelação são transversais a qualquer negócio e outros são específicos da cadeia de abastecimento de biomassa florestal. As variáveis de decisão e o modelo são mais abrangentes e podem ser facilmente adaptados a outras cadeias de abastecimento. Existem alguns parâmetros que variam no horizonte de planeamento, como a quantidade disponível na pilha que vai-se tornando disponível ao longo dos períodos e a procura que também varia de acordo com o período. Camiões com material não processado não podem suportar o mesmo peso de carga, visto que o material por processar ocupa três vezes mais volume que o material processado, resultando no uso do parâmetro de conversão de medição (γ).

Os conjuntos do problema são os seguintes:

- P Conjunto de *supply nodes*
- M Conjunto de *delivery nodes*
- O Conjunto de *intermediate nodes*
- N Conjunto de *destination nodes*, $N = O \cup M$
- S Conjunto de *processing nodes*, $S = P \cup O$
- A Conjunto de arcos possíveis, $A = \{(i, j) : [i \in P \wedge j \in O \cup M] \vee [i \in O \wedge j \in M]\}$
- K Conjunto de máquinas
- T Conjunto de macro-períodos de tempo (meses)
- L^t Conjunto de micro-períodos (dias) de um macro-período $t \in T$

Os parâmetros do problema são os seguintes:

- a'_{pt} Disponibilidade de material por processar num *supply node* $p \in P(ton)$ no macro-período $t \in T$
- $a_{pt} = \sum_{t' \in T: t' \leq t} a'_{pt}$
- b_o Capacidade de armazenamento num *intermediate node* $o \in O(ton)$
- g_{mt} Procura de material processado num *delivery node* $m \in M(ton)$ num macro-período $t \in T$
- r_k produtividade das máquinas $k \in K(ton/h)$
- ψ Taxa de conversão da produtividade
- d_{ij} Distância percorrida ao atravessar o arco $(i, j) \in A(km)$
- γ Taxa de conversão da capacidade de transporte de um camião com material por processar
- q Capacidade de transporte de um camião com material processado (ton)
- α_{ki} Custo por hora da máquina $k \in K$ (€) na localização $i \in S$
- s Custo de deslocação do camião (€/km)
- ω Custo de carregar e descarregar um camião (€)
- τ Tempo total de trabalho por micro-período $l \in L^t$
- σ_o Custo mensal de manter um *intermediate node* $o \in O$ aberto (€)
- β_i Custo de se estabelecer na localização $i \in S$ (€)
- c Número de micro-períodos

As variáveis de decisão do problema são as seguintes:

- $$x_{kil} \begin{cases} 1 & \text{se a máquina do tipo } k \in K \text{ está presente na localização } i \in S \text{ no micro-período } l \in L^t; \\ 0 & \text{se não.} \end{cases}$$
- $$z_{kil} \begin{cases} 1 & \text{se a máquina do tipo } k \in K \text{ esteve na localização } i \in S \text{ no micro-período } l \in L^t; \\ 0 & \text{se não.} \end{cases}$$
- $$y_{ot} \begin{cases} 1 & \text{se o } intermediate \text{ node } o \in O \text{ está aberto ou permanece aberto no macro-período } t \in T; \\ 0 & \text{se não.} \end{cases}$$
- f_{ijl} Fluxo de material a atravessar o arco $(i, j) \in A$ no micro-período $l \in L^t$
- e_{pol} Fluxo de material bruto entre o *supply node* $p \in P$ e o *intermediate node* $o \in O$ no micro-período $l \in L^t$
- r_{oml} Fluxo de material processado no *supply node* $p \in P$, armazenado no *intermediate node* $o \in O$ e transportado para o *delivery node* $m \in M$ no micro-período $l \in L^t$
- h_{kil} Número de horas trabalhadas pela máquina $k \in K$ na localização $i \in S$ no micro-período $l \in L^t$
- s_{ol} Quantidade de material por processar no *intermediate node* $o \in O$ no fim do micro-período $l \in L^t$
- v_{ol} Quantidade de material processado no *intermediate node* $o \in O$ armazenado no *intermediate node* $o \in O$ no fim do micro-período $l \in L^t$
- w_{ol} Quantidade de material processado no *supply node* $p \in P$ armazenado no *intermediate node* $o \in O$ no fim do micro-período $l \in L^t$

De forma a conseguir juntar as variáveis de decisão táticas com as estratégicas foi necessário utilizar uma abordagem com duas escalas temporais. Nesta situação era necessário haver mais flexibilidade dentro dos macro-períodos (nível estratégico) de forma a ter flexibilidade para tomar decisões nos micro-períodos (nível tático). Como se pode ver na Tabela 4.1, durante um macro-período a máquina pode trabalhar apenas em alguns micro-períodos desse macro-período e, caso determinada localização não esteja aberta num dado macro-período, não pode estar alocado uma máquina a essa localização no macro-período correspondente.

Tabela 4.1: Abordagem com duas escalas de tempo diferentes: juntar as variáveis de decisão estratégicas (macro-períodos) com as variáveis de decisão táticas (micro-períodos)

i	Intermediate node 1														
	macro-período														
	t1					t2					t3				
yit	1					1					0				
	micro-período					micro-período					micro-período				
	11	12	13	14	15	11	12	13	14	15	11	12	13	14	15
xkil	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0

A Função Objetivo é a seguinte:

$$\min F = \quad (4.1a)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \frac{d_{ij} \cdot \omega \cdot s \cdot f_{ijl}}{q} + \sum_{(p,o,l) \in A: [p \in P \wedge o \in O]} \frac{d_{po} \cdot \omega \cdot s \cdot e_{pol}}{q \cdot \gamma} + \sum_{(o,m,l) \in A: [o \in O \wedge m \in M]} \frac{d_{om} \cdot \omega \cdot s \cdot r_{oml}}{q} + \quad (4.1b)$$

$$+ \sum_{o \in O} \sum_{t \in T} \sigma_o \cdot y_{ot} + \quad (4.1c)$$

$$+ \sum_{(k,i,l) \in I} \beta_i \cdot Z_{kil} + \quad (4.1d)$$

$$+ \sum_{(k,i,l) \in I} \alpha_{ki} \cdot h_{kil} \quad (4.1e)$$

A função objetivo, Expressão 4.1a, consiste na minimização dos custos logísticos. Esta contém quatro componentes principais: A Expressão 4.1b, que corresponde aos custos de transporte e que por sua vez podem ser divididos no custo de transportar material processado nos *supply nodes* e transportado para *intermediate nodes* ou processado nos *intermediate nodes* e transportado para os *delivery nodes* ou então processado nos *supply nodes* e transportado para os *delivery nodes*, no custo de transportar material por processar entre um *supply node* e um *intermediate node* e no custo de transportar material processado num *supply node*, armazenado num *intermediate node* e transportado para um *delivery node*. A Expressão 4.1c, que corresponde ao custo mensal de manter os *intermediate nodes* abertos. A Expressão 4.1d, que corresponde ao custo de estabelecer as máquinas nas localizações. Por fim, a Expressão 4.1e que diz respeito à minimização dos custos de processamento, que dependem das horas de trabalho de cada máquina.

As restrições associadas ao modelo são as seguintes:

$$\sum_{(j,l):(p,j,l) \in A \wedge l \in L^t: L^t \leq t} f_{pjl} + \sum_{(o,l):(p,o,l) \in A \wedge o \in O \wedge l \in L^t: L^t \leq t} e_{pol} \leq a_{pt}, \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4.2)$$

$$s_{ol} + v_{ol} + w_{ol} \leq b_o, \quad \forall o \in O, \forall l \in L^t \quad (4.3)$$

$$\sum_{(i,l):(i,m,l) \in A \wedge i \in S \wedge l \in L^t} f_{iml} + \sum_{(o,l):(p,o,l) \in A \wedge o \in O \wedge l \in L^t} r_{oml} \leq g_{mt}, \quad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (4.4)$$

$$\sum_{i:(k,i,l) \in I} x_{kil} \leq 1, \quad \forall k \in K, \forall l \in L^t \quad (4.5)$$

$$\sum_{k:(k,i,l) \in I} x_{kil} \leq 1, \quad \forall i \in S, \forall l \in L^t \quad (4.6)$$

$$f_{pml} \leq a_{pt} \sum_{k \in K: (k,p,l) \in I} x_{kpl}, \quad \forall (p,m,l) \in A : p \in P, m \in M, l \in L^t \in T, \forall t \in T \quad (4.7)$$

$$f_{ojl} \leq b_o \sum_{k \in K: (k,o,l) \in I} x_{kol}, \quad \forall (o,j,l) \in A : o \in O \quad (4.8)$$

$$f_{pol} \leq b_o \sum_{t \in T \in L^t} y_{ot}, \quad \forall (p,o,l) \in A : p \in P, o \in O \quad (4.9)$$

$$r_{ojl} \leq b_o \sum_{t \in T \in L^t} y_{ot}, \quad \forall (o,j,l) \in A : o \in O \quad (4.10)$$

$$h_{kil} \leq x_{kil} \tau \quad \forall (k, i, l) \in I \quad (4.11)$$

$$\sum_{k \in K: k, p, l \in I} h_{kpl} \geq \sum_{m \in M: (p, m, l) \in A} \frac{f_{pml}}{r_k \cdot \psi} \quad \forall p \in P, \forall l \in L^t \quad (4.12)$$

$$\sum_{k \in K: k, o, l \in I} h_{kol} \geq \sum_{m \in M: (o, m, l) \in A} \frac{f_{oml}}{r_k} \quad \forall o \in O, \forall l \in L^t \quad (4.13)$$

$$z_{kil} \geq x_{kil} - x_{ki(l-1)} \quad \forall (k, i, l) \in I \quad (4.14)$$

$$z_{ki0} \geq x_{ki0} \quad \forall (k, i, (0)) \in I \quad (4.15)$$

$$c \cdot y_{ot} \geq \sum_{k \in K: (k, o, l) \in I, l \in L^t} x_{kol} \quad \forall o \in O, \forall t \in T \quad (4.16)$$

$$s_{ol} = s_{o(l-1)} + \sum_{p \in P: (p, o, l) \in A} e_{pol} - \sum_{k \in K: (k, o, l) \in I} h_{kol} r_k \quad \forall o \in O, \forall l \in L^t \quad (4.17)$$

$$s_{o(0)} = \sum_{p \in P: (p, o, (0)) \in A} e_{po(0)} - \sum_{k \in K: (k, o, (0)) \in I} h_{ko(0)} r_k \quad \forall o \in O \quad (4.18)$$

$$v_{ol} = v'_{o(t-1)} + \sum_{k \in K: (k, o, l) \in I} h_{kol} r_k - \sum_{m \in M: (o, m, l) \in A} f_{oml} \quad \forall o \in O, \forall l \in L^t \quad (4.19)$$

$$v_{o(0)} = \sum_{k \in K: (k, o, (0)) \in I} h_{ko(0)} r_k - \sum_{m \in M: (o, m, (0)) \in A} f_{om(0)} \quad \forall o \in O \quad (4.20)$$

$$w_{ol} = w_{o(t-1)} + \sum_{p \in P: (p, o, l) \in A} f_{pol} - \sum_{m \in M: (o, m, l) \in A} r_{oml} \quad \forall o \in O \quad (4.21)$$

$$w_{o(0)} = \sum_{p \in P: (p, o, (0)) \in A} f_{po(0)} - \sum_{m \in M: (o, m, (0)) \in A} r_{om(0)} \quad \forall o \in O \quad (4.22)$$

$$y_{ot} = y_{o(t+1)} \quad \forall o \in O, \forall t \in T \quad (4.23)$$

$$x_{kil}, z_{kil}, y_{ot} \in \{0, 1\} \quad (4.24)$$

$$f_{ijl}, e_{pol}, r_{oml}, h_{kil}, s_{ol}, v_{ol}, w_{ol} \geq 0 \quad (4.25)$$

Descrição das restrições:

A restrição 4.2 assegura que a quantidade de material que sai das pilhas não pode ultrapassar a sua disponibilidade; A restrição 4.3 diz respeito à capacidade nos terminais intermédios, ou seja, a quantidade de material num terminal intermédio não pode ultrapassar a sua capacidade de armazenamento; A restrição 4.4 está relacionada com a satisfação da procura, ou seja, assegura que o fluxo de material em cada período satisfaz a procura nesse mesmo período; A restrição 4.5 assegura que uma máquina não pode estar em duas localizações diferentes no mesmo período de tempo enquanto que a restrição 4.6 garante que está apenas uma máquina em cada localização; A restrição 4.7 assegura que só existe fluxo entre um *supply node* e um *delivery node* quando está uma máquina no *supply node*; A restrição 4.8 assegura que só existe fluxo entre um *intermediate node* e um nó j quando está uma máquina no *intermediate node*; A restrição 4.9 assegura que só existe fluxo entre um *supply node* e um *intermediate node* quando o *intermediate node* está aberto; A restrição 4.10 assegura que só existe fluxo entre um *intermediate node* e um nó j

quando o *intermediate node* está aberto; A restrição 4.11 limita o tempo total que uma máquina pode trabalhar num micro-período; A restrição 4.12 assegura que o número de horas que uma máquina se encontra a processar material num *supply node* não pode ser superior ao tempo total de trabalho; A restrição 4.13 assegura que o número de horas que uma máquina se encontra a processar material num *intermediate node* não pode ser superior ao tempo total de trabalho; Só existe alocação de uma máquina quando na utilização anterior a máquina estava numa localização diferente (Restrições 4.14 4.15); A restrição 4.16 assegura que quando uma máquina está alocada a um *intermediate node*, num determinado micro-período esse *intermediate node* tem de estar aberto durante esse período; As restrições (4.17 e 4.18) estão relacionadas com a conservação de fluxo de material por processar nos *intermediate nodes*; As restrições (4.19 e 4.20) estão relacionadas com a conservação de fluxo de material processado nos *intermediate nodes* e armazenado nos *intermediate nodes*. As restrições (4.21 e 4.22) estão relacionadas com a conservação de fluxo de material processado nos *supply nodes* e armazenado nos *intermediate nodes*; De forma a que seja possível tornar o *intermediate node* fixo, foi adicionada a restrição 4.23, que obriga a que quando um terminal abre num determinado período permaneça aberto até ao fim do horizonte de planeamento. As duas últimas restrições (Restrição 4.24 e 4.25) definem os domínios das variáveis de decisão.

4.2 Pré-processamento dos dados

O pré-processamento dos dados é um dos passos mais importantes de forma a se conseguir obter um bom resultado, visto que é nesta fase que se reduz o tamanho do modelo e também a sua complexidade, e, por consequência, se reduz o tempo necessário para obter uma solução usando um *solver* comercial (Soares, Marques, Amorim, & Rasinmäki, 2019). Nesta fase foi criado um *index* e um conjunto de arcos de forma a restringir logo à partida soluções que não fazem sentido obter a partir do modelo matemático em questão. Ao *index* só são adicionados determinados conjuntos que obedeçam a um conjunto de regras estipulado. Como é possível verificar na parte inicial do Algoritmo 1 e na Tabela 4.2, apenas se pode alocar uma máquina num determinado *supply node* e num determinado micro-período, caso a produtividade da máquina seja positiva e o *supply node* tenha disponibilidade de material no período de tempo correspondente. Por outro lado, só se pode colocar uma máquina num determinado *intermediate node* e num determinado micro-período, caso a produtividade da máquina seja positiva. A produtividade da máquina é importante entrar neste pré-processamento pois é com a alteração da verificação do seu valor que se consegue alterar a abordagem ao modelo. Através da mudança de sinal desta verificação, é possível impedir que se realize processamento nos *supply nodes* e/ou *intermediate nodes*. Neste caso em particular qualquer máquina com produtividade positiva pode processar numa localização, porém pode ser interessante em certas situações poder limitar a produtividade das máquinas que se deslocam para determinadas localizações.

As regras para a geração de arcos encontram-se sintetizadas na Tabela 4.3. Estas regras têm como objetivo restringir os arcos da rede de transporte àqueles que realmente fazem sentido

no seio deste problema e que levariam a inconsistências na solução do mesmo. Além das regras básicas expostas na Tabela 4.3, também é possível verificar as restantes regras na segunda parte do Algoritmo 1. Tendo em vista a consistência da solução final, só são adicionados aos arcos os conjuntos que cumprirem as regras anteriormente definidas. No caso de se tratar de um arco entre um *supply node* e um *intermediate node*, só é adicionado o conjunto em que, no mesmo período, o *supply node* tenha disponibilidade e o *intermediate node* tenha capacidade de armazenamento. Por outro lado, num arco entre um *intermediate node* e um *delivery node*, só é adicionado o conjunto em que, no mesmo período, o *intermediate node* tenha capacidade e o *delivery node* esteja a procurar o produto. Por fim, no caso de se tratar de um arco entre um *supply node* e um *delivery node*, só é adicionado o conjunto em que, no mesmo período, o *supply node* tenha disponibilidade e o *delivery node* esteja a procurar o produto. A geração de arcos e a criação do index, além do objetivo já referido anteriormente, também são importantes pois é com a alteração do seu algoritmo que conseguimos mudar a abordagem que queremos fazer ao modelo e desta forma explorar as diferentes dimensões de flexibilidade.

Tabela 4.2: Criação do index

	r_k	a_{pt}	r_k	a_{pt}	r_k	a_{pt}	r_k	a_{pt}
	>0	>0	<0	<0	>0	<0	<0	>0
Supply node								
Intermediate node								

Tabela 4.3: Geração de arcos

Destino Origem	Supply node	Intermediate node	Delivery node
Supply node			
Intermediate node			
Delivery node			

Algorithm 1: Pré-processamento

input: vars (MIP model routing decision variables),
 random_locations (random piles)

```

1  foreach k in chippers do
2    foreach i in locations do
3      foreach period in timeperiod do
4        foreach microperiod in microperiods do
5          if i in supply_nodes then
6            if  $r_k > 0$  and  $a_{pt} > 0$  then
7              add to index;
8          if i in intermediate_nodes then
9            if  $r_k > 0$  then
10              add to index;

11 foreach i in locations do
12   foreach j in locations do
13     foreach period in timeperiod do
14       foreach microperiod in microperiods do
15         if i in supply_nodes and j in intermediate_nodes then
16           if  $a_{pt} > 0$  and  $b_o > 0$  then
17             add to arcs;
18         if i in intermediate_nodes and j in delivery_nodes then
19           if  $b_o > 0$  and  $g_{mt} > 0$  then
20             add to arcs;
21         if i in supply_nodes and j in delivery_nodes then
22           if  $a_{pt} > 0$  and  $g_{mt} > 0$  then
23             add to arcs;
  
```

4.3 Fix-and-optimize

O método de solução proposto consiste numa heurística baseada numa estrutura *fix-and-optimize* (FO) inspirada naquela que foi proposta por Chen (2015); Dastjerdi and Ertogral (2019); Helber and Sahling (2010); Soares et al. (2019). A heurística básica do FO consiste em duas fases principais. Na primeira fase, é encontrada uma solução viável e de qualidade e, na segunda fase, é executado um processo de melhoria nessa solução. A principal lógica da heurística é que ela divide o problema em partes menores e resolve o problema como uma sequência de problemas parciais de programação inteira (Dastjerdi & Ertogral, 2019). Ou seja, o FO consiste em resolver sub-problemas mais pequenos do MIP, de uma forma iterativa, de maneira a reduzir o esforço computacional que é exigido com o alto número de variáveis inteiras. O número de variáveis de decisão binárias representa a maior parte do esforço numérico, enquanto que o número de variáveis reais é de uma importância secundária (Helber & Sahling, 2010). Em cada interação, o FO usa como solução solução incumbente do *solver* a melhor solução encontrada até então. A partir desta solução, é definido um sub-problema fixando grande parte das variáveis binárias e deixando as restantes variáveis de decisão (as que não são usadas na solução) serem otimizadas pelo *solver*. Este processo reduz o número de variáveis binárias "livres" e torna o esforço computacional mais reduzido. Os sub-problemas daí resultantes são então resolvidos pelo *solver* e, visto que o número de variáveis "livres" do sub-problema é muito inferior ao inicial, o tempo de solução é muito mais reduzido.

O *outline* da heurística está representado no Algoritmo 2. A construção dos sub-problemas associados ao *Fix-and-optimize* encontra-se entre as linhas 6-11, consistindo numa selecção aleatória de um dado número de *supply nodes* que servirão de *input* para o Algoritmo 3. Previamente são fixas todas variáveis de decisão x_{kit} que estão associadas à presença de uma máquina nos *supply nodes*, h_{kit} que estão associadas ao número de horas de trabalho de uma máquina nos *supply nodes*, y_{kit} que estão também associadas à presença de uma máquina nos *supply nodes*, sendo que no Algoritmo 3 são libertadas as variáveis associadas aos *supply nodes* escolhidos aleatoriamente segundo um critério. Esse critério consiste na análise da disponibilidade de determinado *supply node*, da procura dos *delivery nodes* e da capacidade dos *intermediate nodes*. O processo de optimização encontra-se na linha 13. Em cada iteração do processo de optimização é dado um tempo limite inicial TL_0 , que é aumentado em TL_{inc} sempre que uma nova solução incumbente é encontrada dentro do tempo inicial estabelecido. De forma a encontrar uma solução inicial de forma rápida, são fixas todas as variáveis x_{kit} , h_{kit} e y_{kit} relacionadas com a presença de uma máquina num *supply node*. Depois de encontrar uma solução inicial (com processamento apenas em *intermediate nodes*) e valores de (x_{solve}, f_{solve}) nas linhas 1-2, a heurística é executada sendo que após cada iteração do *Fix-and-optimize* a solução resultante (x_{solve}, f_{solve}) é avaliada em relação à solução incumbente (x_{best}, f_{best}) , linhas 14-18. No caso da nova solução ser melhor, a construção do sub-problema é reiniciada com $n1$ localizações aleatórias ($n = n1$). Por outro lado, caso a nova solução não seja melhor, são adicionadas $n2$ localizações aleatórias ($n = n2$) ao sub-problema até atingir o tamanho máximo do sub-problema definido pelo parâmetro N .

Algorithm 2: Matheuristic outline

input: MIPmodel (mixed integer programming model),
 TL_0 (time limit for obtaining an initial solution),
 TL_{it} (initial time limit for a solver iteration),
 TL_{inc} (time limit increment in solver iteration if new incumbent solution is found),
 TL_{total} (total time limit),
 it_{max} (number of iterations limit),
 n (initial neighbourhood size),
 N (maximum neighbourhood size)

```

1  fix supply_nodes;
2   $x_{solve}, f_{solve} = \text{MIPsolve}(\text{MIPmodel}, TL_0)$ ;
3   $x_{best} = x_{solve}$ ;  $f_{best} = f_0$ ;  $it = 0$ ;
4  while termination criteria not met do
5       $it = it + 1$ ;
6       $n = 0$ ;
7      selected_locs =  $\emptyset$ ;
8      while  $n \leq N$  do
9          fix supply_nodes;
10         while  $|selected\_locs| < n$  do
11             append random_location to selected_locs
12         construct sub-problem with size  $n$ ;
13         feed MIPmodel with initial solution  $x_{solve}$ ;
14          $x_{solve}, f_{solve} = \text{MIPsolve}(\text{MIPmodel}, TL_{it}, TL_{inc})$ ;
15         if  $f_{solve} < f_{best}$  then
16              $x_{best} = x_{solve}$ ;  $f_{best} = f_{solve}$ ;  $n = 0$ ; selected_locs =  $\emptyset$ ;
17             break
18         else
19              $n = n + 1$ ;
  
```

Algorithm 3: Piles Release

input: vars (MIP model routing decision variables),
 random_locations (random piles)

```

1 foreach k in chippers do
2   foreach i in random_locations do
3     foreach j in intermediate_nodes or delivery_nodes do
4       foreach t in timeperiod do
5         foreach tt in microperiods do
6           if j in delivery_nodes then
7             if  $a_{pt} > 0$  and  $g_{mt} > 0$  then
8               release vars;
9           if j in intermediate_nodes then
10            if  $a_{pt} > 0$  and  $b_o > 0$  then
11              release vars;
12          else
13            fix vars;

```

Capítulo 5

Experiências computacionais

A aproximação proposta foi aplicada num caso de estudo da cadeia de biomassa de florestal, sendo baseada numa empresa fornecedora de lascas de madeira a operar em Portugal. O modelo matemático foi implementado no *solver* de otimização comercial Gurobi 9.0, tendo como ambiente de desenvolvimento o *Python* e os testes foram realizados com auxílio de um processador Intel Core i7-4720HQ @ 2.60GHz. Este modelo foi usado de forma a poder comparar o plano obtido com aquele que é atualmente adotado pelo fornecedor. Foi também realizado um diferente leque de experiências de forma a conseguir obter um importante conjunto de informações, tendo em vista a melhoria do planeamento e a tomada de decisões no seio da cadeia de abastecimento.

5.1 Solução *baseline*

A empresa em estudo é responsável por dimensionar e atribuir as equipas, assim como o equipamento necessário para realizar as operações diárias de processamento e transporte que correspondem ao cumprimento dos pedidos de matéria processada. Estes pedidos são estabelecidos *a priori* como resultado do planeamento de distribuição da biomassa da semana em questão (Marques, Rasinmäki, Soares, & Amorim, 2018). Esta empresa define com as centrais de bioenergia a quantidade mínima de biomassa a ser entregue num ano, porém, apenas uma semana antes da entrega semanal é que se conhece a quantidade que cada central pode receber na próxima semana. Para garantir o fornecimento de biomassa às centrais, esta empresa realiza contratos com terceiros para recolher os resíduos florestais que se encontram nos locais selecionados. Portanto, a empresa tem de realizar um planeamento a longo prazo para definir quais os locais a serem explorados de forma a cumprir com a procura anual. Além do planeamento estratégico, a empresa tem de realizar um planeamento tático para alocar a sua mão de obra e equipamentos e ainda definir quais os fluxos de entrega para cada central de bioenergia.

Os fluxos de material são expressos em metros cúbicos a granel, que traduzem a quantidade efetiva de aparas de madeira obtidas a partir de matéria prima no seu estado "não lascado". Empiricamente, é aceite que 1 metro cúbico de madeira em troncos corresponde a 3 metros cúbicos

de aparas de madeira e 1 tonelada de aparas corresponde a 4 metros cúbicos de aparas de madeira (Soares et al., 2019).

O *baseline* usado neste estudo é o plano anual de logística para este fornecedor de biomassa. Este plano abrange pilhas com disponibilidade sazonal de material e centrais de bioenergia com pedidos semanais (Figura 5.1). As pilhas de resíduos florestais estão dispersas geograficamente e estão disponíveis para serem recolhidas e prontas para serem processadas em determinados momentos do horizonte de planeamento.

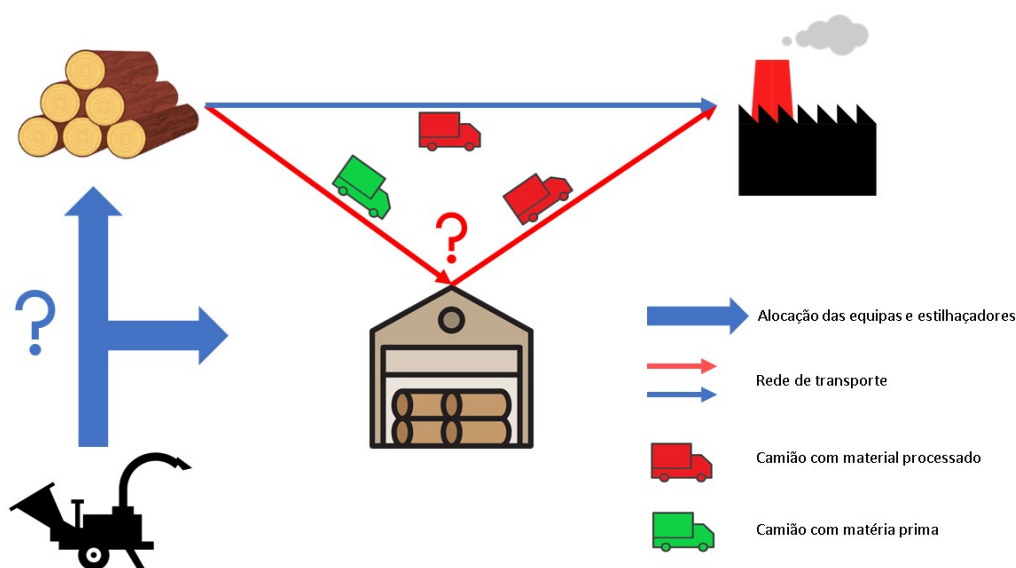


Figura 5.1: Representação do problema: Rede de transporte, alocação de estilhaçadores (máquinas) e equipas, considerando terminais intermédios para processamento e/ou armazenamento

Existem 3 tipos de máquinas de processamento com produtividade heterogênea e custos fixos que correspondem a €3000 para as máquinas mais pequenas e €5000 para as que têm maior produtividade. A produtividade considerada para as diferentes máquinas é de 20 metros cúbicos a granel/hora, 42 metros cúbicos a granel/hora e 60 metros cúbicos a granel/hora, respetivamente. A primeira instância (I1) considerada possui 9 pilhas, 5 terminais intermédios e 3 centrais elétricas. Está dividida num horizonte temporal de 12 períodos correspondentes a 1 ano e cada um destes períodos está subdividido em 20 micro-períodos representantes dos dias de trabalho mensais. O processamento da matéria-prima é realizado por 2 máquinas de produtividade de 20 metros cúbicos a granel/hora. A segunda instância (I2) considerada possui 18 pilhas, 5 terminais intermédios e 3 centrais elétricas. Está dividida num horizonte temporal de 12 períodos correspondentes a 1 ano e cada um destes períodos está subdividido em 20 micro-períodos representantes dos dias de trabalho mensais. O processamento da matéria-prima é realizado por 2 máquinas de produtividade de 20 metros cúbicos a granel/hora. A terceira instância (I3) considerada possui 52 pilhas, 5 terminais intermédios e 3 centrais elétricas. Está dividida num horizonte temporal de 9 períodos e

cada um destes períodos está subdividido em 20 micro-períodos representantes dos dias de trabalho mensais. O processamento da matéria prima é realizado por 2 máquinas de produtividade de 20 metros cúbicos a granel/hora. A quarta instância (I4) considerada possui 282 pilhas, 10 terminais intermédios e 4 centrais elétricas. Está dividida num horizonte temporal de 5 períodos e cada um destes períodos está subdividido em 20 micro-períodos. O processamento da matéria prima é realizado por 2 máquinas de produtividade de 20 metros cúbicos a granel/hora. Por último, a quinta instância (I5) possui 250 pilhas, 10 terminais intermédios e 4 centrais elétricas. Está dividida num horizonte temporal de 9 períodos e cada um destes períodos está subdividido em 20 micro-períodos. O processamento da matéria prima é realizado por 2 máquinas de produtividade de 20 metros cúbicos a granel/hora.

5.2 Comparação entre as diferentes dimensões de flexibilidade

Uma cadeia de abastecimento pode integrar diferentes níveis de flexibilidade. Além da abordagem onde não existe qualquer nível de flexibilidade, existem três tipos de abordagens a serem testadas e comparadas: a um primeiro nível de flexibilidade (flexibilidade logística); outro nível (flexibilidade de processos) que diz respeito à flexibilidade na alocação da equipa e equipamentos; por último, temos um terceiro nível, que diz respeito à integração dos dois níveis falados anteriormente. As quatro abordagens são comparadas segundo um critério específico e aplicadas a diferentes instâncias. A abordagem A que não incorpora nenhum tipo de flexibilidade mas, ao contrário do BAU esta já é otimizada pelo solver. As abordagens B e C que em relação à abordagem A já incorporam flexibilidade logística. As abordagens D e E permitem apenas o processamento em terminais, sendo que no primeiro caso os terminais são móveis e no último são fixos. Por fim, a flexibilidade máxima encontra-se na abordagem F que já incorpora o nível máximo de flexibilidade, podendo o processamento ser realizado em pilhas e/ou terminais móveis, enquanto que a abordagem G é restringida unicamente a terminais fixos. (Tabela 5.1 e Tabela 5.2). De forma a conseguir usar cada uma destas distintas abordagens, o modelo teve de ser manipulado ativando ou desativando restrições, como no caso de querer que os terminais sejam móveis ou fixos, ou então a manipulação do pré-processamento dos dados, apresentado na secção 4.2, permitindo ou não a existência de terminais e permitindo ou não que se realize o processamento do material quer na pilhas quer nos terminais.

Tabela 5.1: Abordagens às diferentes dimensões de flexibilidade

A	Processamento apenas em pilhas sem terminais para armazenamento
B	Processamento apenas em pilhas com terminais moveis para armazenamento
C	Processamento apenas em pilhas com terminais fixos para armazenamento
D	Processamento apenas em terminais móveis
E	Processamento apenas em terminais fixos
F	Processamento em pilhas e em terminais moveis
G	Processamento em pilhas e em terminais fixos

Tabela 5.2: Dimensões de flexibilidade

Flexibilidade logística		Flexibilidade processos		
		Processamento apenas em pilhas	Processamento apenas em terminais	Processamento em ambos
	Sem terminais	A	-	-
	Terminais móveis	B	D	F
	Terminais fixos	C	E	G

Foram variadas combinações de diferentes parâmetros para as diferentes abordagens e utilizando as instâncias I1 e I2. Visto que as diferentes dimensões estão a ser comparadas, o tempo que demora a correr o modelo não é relevante neste conjunto de testes. Sendo assim os testes foram realizados até um *GAP* limite de 10% no caso da instância I1 e até um *GAP* de 15% no caso de I3. Porém o solver nem sempre para no *GAP* que foi destinado, sendo que por essa razão existem soluções que não podem ser comparadas tal é a discrepância de *GAP* entre elas.

Tabela 5.3: Performance das diferentes flexibilidades tendo em conta as instâncias I1 e I3

	A	B	C	D	E	F	G
Instância I1	25 221 €	24 875 €	25 762 €	27 654 €	29 025 €	24 343 €	25 236 €
	10%	10%	10%	10%	9%	10%	9%
Instância I3	479 095 €	447 965 €	444 860 €	517 521 €	517 609 €	346 500 €	467 946 €
	14%	5%	6%	15%	15%	15%	13%

Começando por responder a qual das dimensões de flexibilidade apresenta no geral melhores resultados tendo em conta a Tabela 5.3 foi possível chegar à conclusão que flexibilidade máxima, representada pela letra F é aquela que apresenta de longe melhores soluções. A flexibilidade máxima no pior dos casos tem uma eficiência tão boa quanto qualquer uma das outras, visto que incorpora todos os aspetos das restantes. Visto que o *GAP* é arredondado à unidade, por vezes pequenas percentagens quando os valores da solução são mais elevados distorcem um pouco a solução, mas na generalidade é possível ver perfeitamente que as soluções resultantes da abordagem F são as mais baratas. Na situação da instância I3 é possível observar que apesar de ter o seu respetivo *GAP* tão ou mais alto do que os das restantes abordagens, consegue mesmo assim apresentar uma solução mais baixa.

Segundo a empresa o custo da biomassa entregue às centrais de bioenergia fica por volta dos €25/tonelada (BAU), enquanto que com o modelo desenvolvido e utilizando a flexibilidade máxima para a instância I3, o custo ficou por volta dos €13/tonelada.

5.3 Questões de gestão

De forma a poder comparar esta abordagem com o *Business as usual* (BAU) e a poder comparar as diferentes dimensões de flexibilidade, o modelo proposto foi testado de forma a fornecer algumas questões de gestão adicionais acerca de parâmetros essenciais ao sistema logístico de fornecimento de biomassa. Com este propósito, foi realizado um conjunto de testes que podem servir de suporte à tomada de decisão da empresa fornecedora de biomassa em questão. Foram

então construídos cenários alternativos, alterando os valores dos parâmetros dentro de uma gama de valores possíveis que foram retirados da literatura, e foram comparadas as diferentes possibilidades.

Uma das principais questões que têm de ser incluídas é se vale ou não a pena abrir terminais intermédios e se sim, em que circunstâncias. De forma a responder a estas questões, os custos fixos para abrir um terminal intermédio foram variados numa gama de valores entre [100,1000,5000] e por acréscimo foi criado um parâmetro que permite alterar a dispersão das pilhas e que pode tomar os valores [1,2]. Outra questão que surge é se vale mais a pena ter muitos terminais intermédios e pequenos ou poucos e grandes. De forma a responder a esta pergunta foi variado o número de terminais numa gama de possibilidades entre [1,5,10], sendo que para além disto também foi variada para cada uma destas alternativas a capacidade dos terminais, dividindo a capacidade total de cada um destes por [1,5,10]. Foi também variado o ψ que representa a perda de produtividade que uma máquina alocada a uma determinado pilha tem em relação a se estivesse num terminal. O $\psi = \frac{\text{produtividade do estilhaçador no terminal}}{\text{produtividade do estilhaçador na pilha}}$ representa a taxa de conversão da produtividade.

Com o intuito de responder assim às questões de gestão já apresentadas, foram variadas combinações de diferentes parâmetros para as diferentes abordagens e utilizando as instâncias I1 e I3.

Tabela 5.4: Influência na solução da variação do custo por hora de trabalho para as abordagens A, D, E e F, tendo em conta as instâncias I1 e I3

	Custo/hora	A	D	E	F
I1	130	25 221.00 €	27 654.00 €	29 025.00 €	24 343.00 €
		10%	10%	9%	10%
	250	42 869.00 €	39 270.00 €	39 975.00 €	38 465.79 €
		10%	9%	10%	10%
I3	130	259 322 €	265 427 €	267 082 €	235 406 €
		12.00%	15.00%	15.00%	12.00%
	250	453 664 €	374 317 €	389 117 €	343 197 €
		15.00%	11.00%	14.00%	4.00%

Analisando a Tabela 5.4, verifica-se que quando se aumenta o custo por hora de trabalho de 130 para 250, as abordagens com processamento apenas em terminais (D e E) passam a compensar em relação à abordagem A.

Tabela 5.5: Influência da variação do custo de abertura de um terminal para as abordagens D e E, tendo em conta as instâncias I1 e I3

	Custo abertura terminal	D	E
I1	100	27 654.00 €	29 025.00 €
		10%	9%
	1000	39 297.00 €	43 602.00 €
		10%	10%
	5000	91 148.00 €	91 602.00 €
		10%	10%
I3	100	265 427 €	267 082 €
		15.00%	15.00%
	1000	260 210 €	302 650 €
		9.00%	14.00%
	5000	338 437 €	359 447 €
		15.00%	11.00%

Analisando a Tabela 5.5, verifica-se que à medida que o custo de abertura de um terminal aumenta, o impacto na subida da solução é menor quando se está a trabalhar na instância I3. Isto acontece pois compensa mais pagar custos de abertura por terminal elevados quando existe um fluxo de material que justifique esse custo acrescido.

Tabela 5.6: Influência da instância em questão (I1 ou I3) para a abordagem E em relação à abordagem A

	A	D	E	Impacto na solução da mudança de A para E
I1	25 221.00 €	27 654.00 €	29 025.00 €	-15%
	10%	10%	9%	
I3	259 322 €	265 427 €	267 082 €	-3%
	12.00%	15.00%	15.00%	

Analisando a Tabela 5.6, verifica-se que o impacto de abrir terminais fixos (Abordagem E) em relação à abordagem A, é mais baixo para a instância I3. Para a instância I1, há um impacto negativo de 15% ao passar a usar a estratégia E em vez da A. No caso da instância I3, esse impacto é de apenas 3 %. Sendo assim, apenas existe a possibilidade de compensar abrir terminais fixos quando existe muito material para processar, sendo que tem de se pagar o período todo quando se abrem terminais deste tipo. Desta forma, é possível chegar à conclusão que na maior parte das vezes compensa ter a flexibilidade de abrir os terminais para processamento apenas quando necessário (Abordagem D).

Tabela 5.7: Influência coeficiente de dispersão das pilhas para a abordagem F em relação à abordagem A, tendo em conta as instâncias I1 e I3

	Coef.Dispersão	A	F	Impacto na solução da mudança de A para F
I1	1	25 221.00 €	24 343.00 €	3.48%
		10%	10%	
	2	28 370.00 €	27 826.00 €	1.92%
		9%	10%	
I3	1	259 322 €	235 406 €	9.22%
		12.00%	12.00%	
	2	284 564 €	270 812 €	4.83%
		15.00%	13.00%	

Analisando a Tabela 5.7, verifica-se que quando a dispersão aumenta para o dobro a melhoria em relação à abordagem A deixa de ser tão significativa. O custo de transportar material por estilhar é 3 vezes superior aos custos de transportar material já processado, visto que só é possível transportar um terço da quantidade. A solução quando as pilhas se encontram muito dispersas passa por ter terminais mais perto das pilhas, diminuindo assim os custos de transporte de material por estilhar e tendo na mesma a produtividade superior que os terminais oferecem em detrimento das pilhas.

Tabela 5.8: Influência do número terminais e da sua capacidade para as abordagens D, E e F, tendo em conta a instância I3.

	Nº terminais	Divisor da capacidade	D	E	F
I3	1	1	315 347 €	315 347 €	253 364 €
			0%	0%	13%
	1	5	315 347 €	315 347 €	257 265 €
			0%	0%	12%
	1	10	315 347 €	315 347 €	255 526 €
			0%	0%	14%
	5	1	265 827 €	266 731 €	219 768 €
			15%	15%	7%
	5	5	282 827 €	265 963 €	225 753 €
			21%	15%	9%
	5	10	259 769 €	265 197 €	245 761 €
			14%	14%	16%
	10	1	219 098 €	239 821 €	207 550 €
			9%	16%	5%
	10	5	234 769 €	239 840 €	215 145 €
			15%	16%	9%
	10	10	219 639 €	232 597 €	224 304 €
			9%	13%	13%

Analisando a Tabela 5.8, verifica-se que à medida que o número de terminais aumenta, são

criados mais pontos possíveis para a otimização da rede, levando a que a melhoria em relação à abordagem A também assim aumente. Por outro lado, a questão: "Compensa ter muitos terminais e pequenos ou poucos e grandes?" não pode ser respondida pois a limitação da capacidade dos terminais acaba por praticamente não influenciar os custos. Isto acontece porque a capacidade é definida por períodos e sendo assim o armazenamento é feito por um curto espaço de tempo, não permitindo que esta limitação de capacidade tenha grandes repercussões na solução.

Tabela 5.9: Influência do custo de abertura de um terminal e da taxa de conversão da produtividade ψ em relação aos terminais para as abordagens A, D, E e F e tendo em conta a instância I1 e I3

	Custo abertura terminal	ψ	A	D	E	F
I1	100	1	19 490.00 €	27 269.00 €	29 025.00 €	19 090.00 €
			10%	9%	9%	10%
	1000	1	19 515.00 €	39 806.00 €	39 825.00 €	19 014.00 €
			10%	10%	10%	10%
	5000	1	19 687.00 €	91 886.00 €	93 398.00 €	19 479.00 €
			10%	9%	8%	9%
	100	1.5	25 221.00 €	27 654.00 €	29 025.00 €	24 343.00 €
			10%	10%	9%	10%
	1000	1.5	25 383.00 €	39 297.00 €	43 602.00 €	25 819.00 €
			10%	10%	10%	10%
	5000	1.5	25 766.79 €	91 148.00 €	91 602.00 €	25 546.00 €
			10%	10%	10%	8%
I3	100	1	196 693 €	257 686 €	265 716 €	193 574 €
			11.00%	14.00%	15.00%	16.00%
	1000	1	194 761 €	261 085 €	298 700 €	194 462 €
			17.00%	9.00%	15.00%	15.00%
	5000	1	194 663 €	336 987 €	359 447 €	203 122 €
			15.00%	15.00%	15.00%	15.00%
	100	1.5	259 322 €	265 427 €	267 082 €	235 406 €
			12.00%	15.00%	15.00%	12.00%
	1000	1.5	258 292 €	260 210 €	302 650 €	248 804 €
			14.00%	9.00%	14.00%	15.00%
	5000	1.5	258 130 €	338 437 €	359 447 €	276 376 €
			14.00%	15.00%	11.00%	18.00%

Analisando a Tabela 5.9, verifica-se que normalmente não compensa abrir terminais quando a produtividade é a mesma nos terminais e nas pilhas, por outro lado quando estamos na situação real e as máquinas são mais produtivas nos terminais do que nas pilhas é possível verificar que já compensa abrir terminais. Quando a produtividade é a mesma nos terminais e nas pilhas o fator custo de abertura do terminal ainda mais influencia, compensando ainda menos abrir terminais.

As tabelas com os resultados todos encontram-se no anexo A.

5.4 Abordagem pela mateurística - *Fix-and-optimize*

Os parâmetros usados pela mateurística encontram-se na Tabela 5.10. Estes parâmetros foram obtidos de forma preliminar através da avaliação da convergência do modelo ao longo do processo.

Os parâmetros foram escolhidos segundo grupos, que por sua vez estão definidos através da complexidade da instância em questão. Como já foi referido em 4.3, a complexidade da instância foi avaliada através do número de variáveis binárias inteiras, que são o principal responsável pelo esforço computacional realizado.

Tabela 5.10: Parâmetros usados pela abordagem via mateurística

Instância	NºVariáveis binárias	T10	Tlit	Tlinc	Vizinhança	Grupo
I1	13608	30	20	40	[2,4]	Pequena
I2	22356	30	20	40	[2,4]	
I3	41553	30	20	40	[2,4]	
I4	118260	100	50	100	[40,50]	Média
I5	189540	100	200	400	[40,50]	Grande

Sendo assim as instâncias foram agrupadas consoante o intervalo em que se inseriam. As instâncias cujo número de variáveis se insere no intervalo $[0,50000]$ são consideradas pequenas, as que se inserem no intervalo $]50000,150000]$ são consideradas médias e por fim, aquelas que se inserem no intervalo $[150000,\infty]$ são consideradas grandes.

A Tabela 5.11 sumariza os resultados da mateurística para as diferentes instâncias analisadas. É possível ver para cada instância se esta obteve solução pelo MIP *solver* e em quanto tempo o realizou e o mesmo para a abordagem pelo *Fix-and-optimize*. A penúltima coluna representa o tempo total que foi dado a cada instância para realizar os respectivos testes, enquanto que a última indica qual das abordagens teve uma melhor performance.

Tabela 5.11: Comparação entre o MIP *solver* e abordagem pela mateurística para as diferentes instâncias

Instância	Melhor solução obtida pelo MIP solver	Tempo decorrido no MIP solver até encontrar a melhor solução	Solução obtida pelo Fix-and-optimize	Tempo decorrido no Fix-and-optimize até encontrar a melhor solução	Tempo de teste total	Melhor abordagem
I1	24 369 €	2513s	24 353 €	1652s	3600s	Fix-and-optimize
I2	42 774 €	2799s	45 200 €	2272s	3600s	MIP solver
I3	217 322 €	2620s	266 269 €	1918.88s	3600s	MIP solver
I4	350 863 €	7154s	346 722 €	6650.66s	7200s	Fix-and-optimize
I5	-	-	768 023 €	6647.08s	7200s	Fix-and-optimize

Como é possível verificar na Tabela 5.11, o FO conseguiu melhores resultados que o MIP *solver* em três das cinco instâncias analisadas.

Apesar de a instância I1 ser pouco complexa e "pesada" para o solver, o FO conseguiu obter uma solução mais baixa que aquela que foi conseguida pelo MIP *solver* e em quase menos 1000 segundos que este último (Gráfico 5.2.)

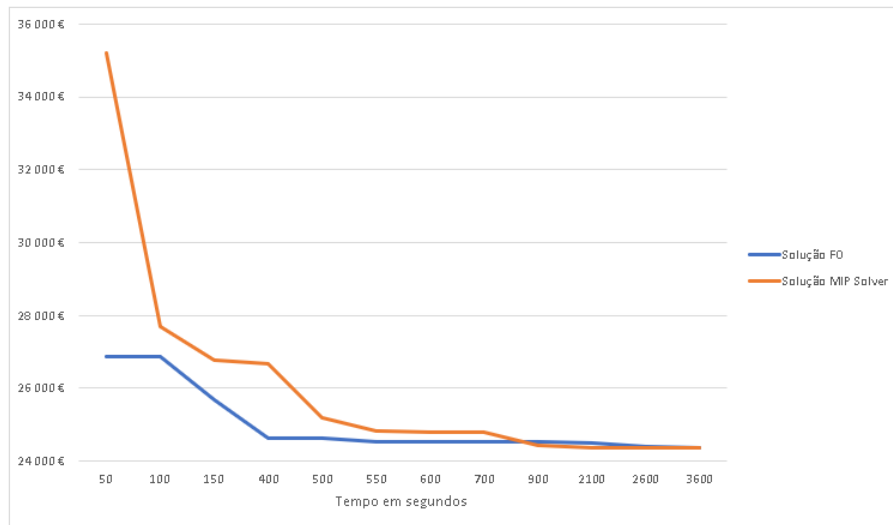


Figura 5.2: *Fix-and-optimize* vs MIP *solver* para a instância I1.

Para a instância I2 e I3 o FO não conseguiu sequer se aproximar de perto da eficiência do MIP *solver*.

O *Fix-and-optimize* tem um particular interesse ao ser usado na obtenção de resultados em instâncias mais complexas, ou seja, com mais variáveis binárias. A instância I4 foi considerada no grupo das instâncias "médias", sendo assim possível verificar com mais detalhe o valor desta mateurística. Como é possível ver no Gráfico 5.3, a solução através do MIP *solver*, apenas encontrou a sua solução inicial aos 7050 segundos, enquanto que em 102 segundos já existia uma solução através de FO. Visto que a solução inicial é obtida a partir da limitação do uso dos *supply nodes* para processamento, fica muito mais simples para o *solver* encontrar uma solução inicial e de seguida ir iterativamente adicionando outras possibilidades ao modelo, melhorando assim a eficiência do mesmo.

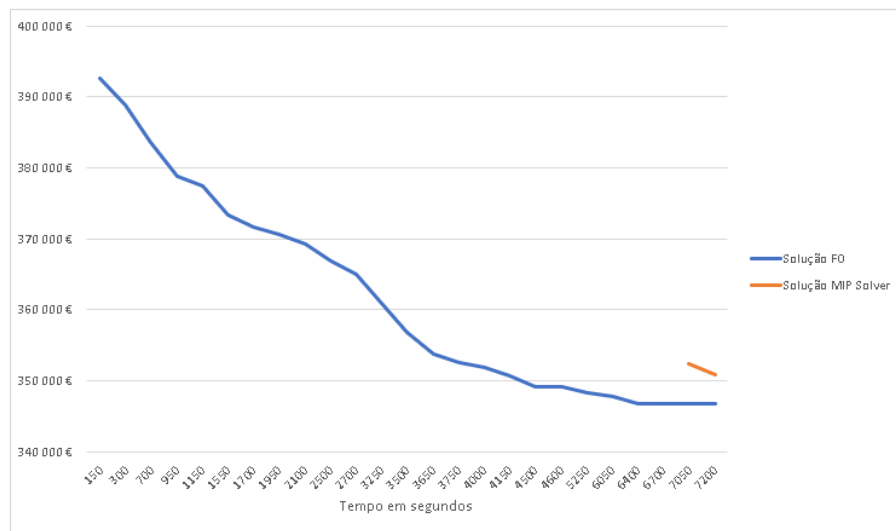


Figura 5.3: Fix-and-optimize vs MIP solver para a instância I4

Por fim, e para a instância mais "pesada" de todas, a instância I5, o MIP *solver* foi incapaz de produzir uma única solução em 7200 segundos, enquanto que o FO em 104 segundos obteve uma solução inicial com processamento realizado apenas em *intermediate nodes* e em apenas 517 segundos já melhorou essa mesma solução com a inserção de alguns *supply nodes* na solução.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

Nesta dissertação é apresentado um *Multi-Scale mobile Facility Location Problem with Equipment Assignment* (MS-mFLP-EA), motivado por um caso real da cadeia de abastecimento de biomassa florestal Portuguesa. Apesar de a literatura acerca de grande parte das questões aqui faladas seja vasta, existe uma falha no que toca à incorporação de diferentes variantes de um *Facility Location Problem* (FLP) para responder à complexidade da cadeia de abastecimento. Outra das maiores contribuições foi a integração das decisões táticas e estratégicas num FLP, sendo que na literatura normalmente apenas se referem acerca das decisões estratégicas. Além destas contribuições, foi também apresentado um método de solução para responder a instâncias maiores e mais pesadas, sendo que por vezes o MIP *solver* por si só nem era capaz de encontrar uma solução inicial rapidamente. Através deste estudo chegou-se à conclusão que o uso de abordagens mais flexíveis através da inserção de *intermediate nodes* é claramente mais vantajosa em relação aquela que é usada atualmente.

Como trabalho futuro penso que deveriam ser explorados sub-problemas diferentes na matemática utilizada, podendo assim conseguir que a solução convirja mais rapidamente para o pretendido. Além disso, também deveriam ser testadas instâncias ainda mais "pesadas" de forma a testar o algoritmo obtido em situações mais complicadas, podendo nesses casos ser útil a exploração de novos sub-problemas que referi anteriormente. Por outro lado, também seria interessante considerar o teor de humidade ao longo do tempo de armazenamento na formulação do modelo matemático. Num dos poucos estudos que avaliam o impacto da variação da humidade da matéria no planeamento logístico é analisado o potencial benefício da incorporação de terminais intermédios tendo em vista a descida do teor de humidade das lascas de madeira (Marques et al., 2018). Sendo assim seria interessante que a procura das centrais elétricas fosse feita em relação a poder calorífico e não a toneladas, fazendo com que as empresas que exploram este mercado tivessem em atenção o teor de humidade da biomassa antes de ser levado para o seu estágio final. Seria também interessante que a replicabilidade deste modelo matemático fosse testada noutra *supply chain* de forma a testar a sua capacidade de adaptação.

Anexo A

Resultados do MIP *solver*

Tabela A.1: Resultados do MIP *solver* para I1. Solução (€) e respetivo *GAP* (%) em função do custo por hora de trabalho, o custo de abertura de um terminal, o ψ (variação da produtividade das máquinas nas pilhas) e o coeficiente de dispersão das pilhas.

Custo/hora	Custo abertura terminal	ψ	Coef. Dispersão das pilhas	A	B	C	D	E	F	G
130	100	1	1	19 490.00 €	19 300.00 €	19 151.00 €	27 269.00 €	29 025.00 €	19 090.00 €	19 090.00 €
				10%	13%	9%	9%	9%	10%	10%
130	100	1	2	22 500.00 €	21 807.00 €	22 057.00 €	33 736.09 €	35 736.42 €	21 807.00 €	22 410.00 €
				10%	10%	9%	11%	10%	10%	10%
130	100	1.5	1	25 221.00 €	24 875.00 €	25 762.00 €	27 654.00 €	29 025.00 €	24 343.00 €	25 236.00 €
				10%	10%	10%	10%	9%	10%	9%
130	100	1.5	2	28 370.00 €	28 156.78 €	28 742.00 €	33 254.00 €	35 736.42 €	27 826.00 €	28 853.00 €
				9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
130	1000	1	1	19 515.00 €	18 969.00 €	19 485.00 €	39 806.00 €	39 825.00 €	19 014.00 €	19 589.00 €
				10%	10%	9%	10%	10%	10%	10%
130	1000	1	2	22 441.33 €	22 000.00 €	22 557.00 €	45 153.00 €	46 536.00 €	22 057.00 €	23 039.00 €
				10%	10%	9%	10%	9%	9%	10%
130	1000	1.5	1	25 383.00 €	25 710.00 €	25 872.00 €	39 297.00 €	43 602.00 €	25 819.00 €	26 085.00 €
				10%	10%	9%	10%	10%	10%	10%
130	1000	1.5	2	28 176.00 €	28 961.00 €	28 771.00 €	45 440.47 €	47 536.00 €	28 623.00 €	28 909.00 €
				10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
130	5000	1	1	19 687.00 €	18 976.00 €	19 651.00 €	91 886.00 €	93 398.00 €	19 479.00 €	19 441.00 €
				10%	10%	10%	9%	8%	9%	7%
130	5000	1	2	23 266.00 €	22 193.00 €	22 499.00 €	94 829.00 €	98 310.00 €	23 034.00 €	22 581.00 €
				10%	10%	9%	9%	10%	10%	9%
130	5000	1.5	1	25 766.79 €	25 690.00 €	25 389.00 €	91 148.00 €	91 602.00 €	25 546.00 €	26 064.00 €
				10%	10%	10%	10%	8%	8%	10%
130	5000	1.5	2	28 558.00 €	28 456.00 €	29 131.00 €	95 036.00 €	100 677.00 €	28 732.00 €	29 159.00 €
				10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
250	100	1	1	31 053.00 €	30 282.94 €	31 294.00 €	39 620.00 €	42 295.33 €	30 152.00 €	30 419.00 €
				10%	10%	10%	10%	11%	10%	10%
250	100	1	2	33 830.00 €	33 347.00 €	33 757.00 €	45 306.00 €	47 686.00 €	33 330.00 €	33 074.00 €
				10%	10%	10%	10%	10%	10%	7%
250	100	1.5	1	42 869.00 €	42 890.00 €	42 790.00 €	39 270.00 €	39 975.00 €	38 465.79 €	40 920.91 €
				10%	10%	9%	9%	10%	10%	10%
250	100	1.5	2	46 070.00 €	46 205.08 €	45 863.00 €	44 385.00 €	46 850.00 €	43 105.00 €	44 543.00 €
				10%	10%	8%	8%	8%	10%	9%
250	1000	1	1	30 761.00 €	30 402.00 €	30 789.00 €	51 228.00 €	54 552.00 €	30 655.00 €	30 560.00 €
				9%	10%	9%	9%	10%	10%	10%
250	1000	1	2	33 507.00 €	33 492.00 €	33 554.00 €	57 220.00 €	58 486.00 €	33 931.00 €	33 445.00 €
				9%	10%	10%	10%	8%	10%	10%
250	1000	1.5	1	43 136.00 €	42 854.01 €	43 608.00 €	51 025.00 €	50 775.00 €	43 207.53 €	43 770.00 €
				9%	9%	10%	9%	9%	10%	9%
250	1000	1.5	2	46 149.00 €	46 222.00 €	46 756.00 €	56 737.00 €	61 260.00 €	46 199.42 €	45 622.00 €
				10%	10%	10%	10%	10%	10%	7%
250	5000	1	1	30 839.00 €	30 873.00 €	30 590.00 €	103 552.00 €	98 775.00 €	31 576.00 €	30 712.00 €
				9%	10%	9%	9%	10%	10%	10%
250	5000	1	2	33 643.00 €	33 970.00 €	34 526.00 €	106 867.00 €	109 260.00 €	34 707.00 €	33 507.00 €
				9%	10%	9%	10%	10%	10%	10%
250	5000	1.5	1	43 201.00 €	43 286.90 €	42 822.00 €	102 232.00 €	104 598.00 €	41 977.00 €	42 485.00 €
				10%	9%	9%	10%	10%	5%	9%
250	5000	1.5	2	46 449.42 €	46 054.00 €	45 532.00 €	105 736.00 €	116 506.00 €	46 039.00 €	46 099.82 €
				10%	10%	9%	10%	10%	10%	10%

Tabela A.2: Resultados do MIP *solver* para I3. Solução (€) e respetivo *GAP* (%) em função do custo por hora de trabalho, o custo de abertura de um terminal, o ψ (variação da produtividade das máquinas nas pilhas) e o coeficiente de dispersão das pilhas.

Custo/hora	Custo abertura terminal	ψ	Coef. Dispersão das pilhas	A	B	C	D	E	F	G
130	100	1	1	196 693 €	192 370 €	193 653 €	257 686 €	265 716 €	193 574 €	199 909 €
				11.00%	15.00%	15.00%	14.00%	15.00%	16.00%	18.00%
130	100	1	2	216 898 €	217 026 €	217 720 €	306 245 €	299 091 €	215 729 €	223 984 €
				15.00%	15.00%	15.00%	13.00%	11.00%	15.00%	17.00%
130	100	1.5	1	259 322 €	259 433 €	261 791 €	265 427 €	267 082 €	235 406 €	247 590 €
				12.00%	15.00%	13.00%	15.00%	15.00%	12.00%	16.00%
130	100	1.5	2	284 564 €	280 961 €	284 368 €	310 969 €	323 130 €	270 812 €	266 996 €
				15.00%	15.00%	11.00%	14.00%	16.00%	13.00%	11.00%
130	1000	1	1	194 761 €	197 424 €	196 637 €	261 085 €	298 700 €	194 462 €	206 111 €
				17.00%	15.00%	14.00%	9.00%	15.00%	15.00%	16.00%
130	1000	1	2	219 375 €	222 393 €	221 252 €	301 291 €	363 174 €	221 698 €	225 733 €
				15.00%	15.00%	14.00%	7.00%	16.00%	15.00%	15.00%
130	1000	1.5	1	258 292 €	259 982 €	-	260 210 €	302 650 €	248 804 €	251 157 €
				14.00%	13.00%	-	9.00%	14.00%	15.00%	13.00%
130	1000	1.5	2	284 673 €	285 107 €	282 761 €	316 476 €	363 174 €	292 953 €	284 130 €
				14.00%	13.00%	10.00%	15.00%	16.00%	16.00%	13.00%
130	5000	1	1	194 663 €	196 459 €	194 037 €	336 987 €	359 447 €	203 122 €	195 490 €
				15.00%	15.00%	15.00%	15.00%	15.00%	15.00%	15.00%
130	5000	1	2	219 297 €	217 488 €	219 288 €	391 635 €	445 328 €	220 971 €	216 699 €
				15.00%	15.00%	15.00%	15.00%	15.00%	14.00%	13.00%
130	5000	1.5	1	258 130 €	258 480 €	259 513 €	338 437 €	359 447 €	276 376 €	256 932 €
				14.00%	10.00%	11.00%	15.00%	11.00%	18.00%	10.00%
130	5000	1.5	2	283 526 €	280 855 €	281 434 €	394 472 €	445 328 €	292 685 €	303 905 €
				13.00%	10.00%	10.00%	15.00%	13.00%	15.00%	16.00%
250	100	1	1	308 334 €	309 777 €	306 674 €	386 083 €	386 744 €	316 207 €	305 419 €
				12.00%	12.00%	9.00%	14.00%	14.00%	15.00%	11.00%
250	100	1	2	331 644 €	332 128 €	332 436 €	421 933 €	409 263 €	346 095 €	348 014 €
				11.00%	12.00%	11.00%	11.00%	15.00%	15.00%	14.00%
250	100	1.5	1	453 664 €	429 592 €	425 519 €	374 317 €	389 117 €	343 197 €	385 206 €
				15.00%	10.00%	8.00%	11.00%	14.00%	4.00%	14.00%
250	100	1.5	2	480 043 €	451 727 €	451 385 €	437 974 €	431 730 €	444 179 €	427 896 €
				15.00%	9.00%	8.00%	14.00%	13.00%	17.00%	13.00%
250	1000	1	1	307 260 €	308 863 €	307 913 €	404 965 €	414 750 €	320 253 €	325 232 €
				12.00%	11.00%	9.00%	15.00%	15.00%	14.00%	15.00%
250	1000	1	2	331 292 €	331 659 €	358 164 €	460 198 €	433 214 €	349 870 €	354 096 €
				11.00%	9.00%	15.00%	15.00%	8.00%	14.00%	16.00%
250	1000	1.5	1	456 292 €	426 416 €	426 475 €	407 715 €	409 158 €	405 087 €	395 487 €
				15.00%	8.00%	7.00%	15.00%	11.00%	15.00%	11.00%
250	1000	1.5	2	446 823 €	450 346 €	460 355 €	413 249 €	445 609 €	458 573 €	486 253 €
				6.00%	8.00%	8.00%	6.00%	8.00%	16.20%	19.00%
250	5000	1	1	308 384 €	307 370 €	306 855 €	456 952 €	478 072 €	327 316 €	343 818 €
				12.00%	8.00%	10.00%	14.00%	15.00%	15.00%	19.00%
250	5000	1	2	334 302 €	331 388 €	329 546 €	506 785 €	632 517 €	353 494 €	368 212 €
				12.00%	9.00%	9.00%	14.00%	21.00%	15.00%	18.30%
250	5000	1.5	1	450 698 €	423 750 €	424 799 €	456 268 €	515 689 €	433 965 €	453 212 €
				14.00%	6.00%	7.00%	15.00%	15.00%	15.00%	15.00%
250	5000	1.5	2	479 095 €	447 965 €	444 860 €	517 521 €	517 609 €	346 500 €	467 946 €
				14.00%	5.00%	6.00%	15.00%	15.00%	15.00%	13.00%

Tabela A.3: Resultados do MIP *solver* para I3. Solução (€) e respetivo *GAP* (%) em função do número de terminais, do divisor de capacidade, do custo por hora de trabalho e do ψ (variação da produtividade das máquinas nas pilhas).

Nº Terminais	Divisor de capacidade	Custo/hora	ψ	A	B	C	D	E	F	G
1	1	130	1	200 050 € 14%	196 838 € 18%	196 313 € 15%	315 347 € 0%	315 347 € 0%	195 907 € 15%	198 470 € 1500%
1	1	130	1.5	257 266 € 9%	261 801 € 13%	259 478 € 11%	315 347 € 0%	315 347 € 0%	253 364 € 13%	253 445 € 13%
1	1	250	1	311 537 € 13%	307 971 € 12%	308 429 € 12%	425 777 € 0%	425 777 € 0%	319 148 € 15%	318 830 € 15%
1	1	250	1.5	423 329 € 6%	465 796 € 15%	461 620 € 14%	425 777 € 0%	425 777 € 0%	405 755 € 8%	395 161 € 6%
1	5	130	1	195 064 € 15%	194 414 € 15%	195 221 € 15%	315 347 € 0%	315 347 € 0%	194 370 € 15%	199 310 € 15%
1	5	130	1.5	257 267 € 8%	260 426 € 15%	262 104 € 12%	315 347 € 0%	315 347 € 0%	257 265 € 12%	257 632 € 14%
1	5	250	1	334 898 € 15%	307 605 € 11%	308 415 € 12%	425 777 € 0%	425 777 € 0%	320 936 € 15%	314 616 € 13%
1	5	250	1.5	427 223 € 7%	468 757 € 18%	432 859 € 10%	425 777 € 0%	425 777 € 0%	411 559 € 10%	409 418 € 9%
1	10	130	1	196 756 € 12%	194 165 € 15%	193 247 € 15%	315 347 € 0%	315 347 € 0%	196 347 € 15%	196 377 € 15%
1	10	130	1.5	258 930 € 9%	258 300 € 11%	257 136 € 10%	315 347 € 0%	315 347 € 0%	255 526 € 14%	268 758 € 16%
1	10	250	1	307 598 € 11%	307 692 € 12%	308 705 € 12%	425 777 € 0%	425 777 € 0%	317 032 € 15%	320 679 € 15%
1	10	250	1.5	424 397 € 6%	427 556 € 7%	423 475 € 6%	425 777 € 0%	425 777 € 0%	420 429 € 11%	411 767 € 9%
5	1	130	1	193 278 € 15%	191 893 € 15%	199 087 € 15%	255 428 € 12%	263 251 € 14%	189 353 € 15%	191 653 € 16%
5	1	130	1.5	258 907 € 15%	257 110 € 14%	261 573 € 13%	265 827 € 15%	266 731 € 15%	219 768 € 7%	246 475 € 16%
5	1	250	1	306 682 € 12%	308 881 € 12%	312 553 € 11%	399 835 € 16%	376 938 € 12%	319 677 € 15%	317 687 € 13%
5	1	250	1.5	424 509 € 8%	427 262 € 9%	427 672 € 8%	395 816 € 15%	385 645 € 14%	395 227 € 16%	389 033 € 14%
5	5	130	1	193 688 € 15%	193 100 € 16%	194 256 € 15%	259 769 € 14%	266 846 € 15%	190 192 € 15%	193 542 € 16%
5	5	130	1.5	258 629 € 15%	257 462 € 14%	263 026 € 14%	282 827 € 21%	265 963 € 15%	225 753 € 9%	243 163 € 15%
5	5	250	1	306 421 € 8%	307 841 € 11%	311 401 € 13%	384 702 € 13%	380 740 € 12%	315 318 € 14%	320 780 € 15%
5	5	250	1.5	425 856 € 8%	428 393 € 9%	427 497 € 8%	382 576 € 13%	405 738 € 17%	409 690 € 19%	391 939 € 15%
5	10	130	1	195 253 € 15%	192 801 € 16%	199 608 € 16%	258 358 € 13%	259 769 € 14%	189 845 € 15%	190 901 € 15%
5	10	130	1.5	258 448 € 15%	261 273 € 14%	260 506 € 14%	259 769 € 21%	265 197 € 15%	245 761 € 9%	238 549 € 15%
5	10	250	1	309 359 € 8%	310 427 € 12%	309 331 € 9%	389 787 € 15%	398 550 € 15%	317 861 € 15%	326 512 € 17%
5	10	250	1.5	452 246 € 15%	428 422 € 10%	429 732 € 9%	369 004 € 9%	370 199 € 10%	368 014 € 10%	393 564 € 15%
10	1	130	1	193 591 € 15%	194 108 € 17%	194 435 € 15%	216 179 € 8%	232 870 € 13%	190 976 € 16%	192 667 € 14%
10	1	130	1.5	258 966 € 15%	264 224 € 16%	262 916 € 15%	219 098 € 9%	239 821 € 16%	207 550 € 5%	214 180 € 8%
10	1	250	1	309 067 € 12%	311 811 € 13%	311 499 € 12%	380 075 € 19%	337 672 € 8%	315 825 € 14%	318 512 € 15%
10	1	250	1.5	452 559 € 15%	429 039 € 10%	427 864 € 9%	375 480 € 18%	375 944 € 17%	361 154 € 15%	327 686 € 6%
10	5	130	1	192 376 € 15%	191 796 € 16%	199 841 € 16%	234 827 € 15%	235 073 € 14%	196 771 € 19%	191 065 € 16%
10	5	130	1.5	259 104 € 15%	258 257 € 15%	261 318 € 13%	234 769 € 15%	239 840 € 16%	215 145 € 9%	233 382 € 15%
10	5	250	1	309 459 € 13%	309 601 € 12%	310 476 € 9%	341 906 € 9%	369 242 € 15%	318 965 € 15%	319 989 € 15%
10	5	250	1.5	450 611 € 15%	428 513 € 10%	428 324 € 9%	337 366 € 8%	365 099 € 15%	339 017 € 9%	349 833 € 11%
10	10	130	1	194 674 € 17%	192 459 € 16%	192 012 € 15%	243 643 € 18%	246 220 € 18%	192 715 € 17%	193 177 € 14%
10	10	130	1.5	261 090 € 16%	256 995 € 14%	260 698 € 13%	219 639 € 13%	232 597 € 13%	224 304 € 13%	234 187 € 16%
10	10	250	1	333 779 € 16%	310 453 € 12%	311 886 € 11%	348 121 € 11%	362 941 € 14%	310 412 € 12%	-
10	10	250	1.5	428 414 € 10%	427 218 € 10%	428 030 € 9%	351 806 € 12%	364 660 € 14%	336 790 € 8%	353 349 € 13%

Bibliografia

- Akhtari, S., Sowlati, T., & Griess, V. C. (2018). Integrated strategic and tactical optimization of forest-based biomass supply chains to consider medium-term supply and demand variations. *Applied Energy*, 213(June), 626–638. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.017> doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.017
- Audy, J. F., D'Amours, S., & Rönnqvist, M. (2012). An empirical study on coalition formation and cost/savings allocation. *International Journal of Production Economics*, 136(1), 13–27. doi: 10.1016/j.ijpe.2011.08.027
- Bashiri, M., Badri, H., & Talebi, J. (2012). A new approach to tactical and strategic planning in production-distribution networks. *Applied Mathematical Modelling*, 36(4), 1703–1717. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.018> doi: 10.1016/j.apm.2011.09.018
- Bouchard, M., D'Amours, S., Rönnqvist, M., Azouzi, R., & Gunn, E. (2017). Integrated optimization of strategic and tactical planning decisions in forestry. *European Journal of Operational Research*, 259(3), 1132–1143. doi: 10.1016/j.ejor.2016.11.022
- Cabral, I. (2012). An Information Model for Lean, Agile, Resilient and Green Supply Chain Management. *Fauldade De Ciencias E Tecnologia Universidade Nona De Lisboa*(April 2012), 37–41. Retrieved from <http://run.unl.pt/handle/10362/6620>
- Chauhan, D., Unnikrishnan, A., & Figliozzi, M. (2019). Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 99(May 2018), 1–18. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.12.001> doi: 10.1016/j.trc.2018.12.001
- Chen, H. (2015). Fix-and-optimize and variable neighborhood search approaches for multi-level capacitated lot sizing problems. *Omega*, 56, 25 - 36. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048315000432> doi: 10.1016/j.omega.2015.03.002
- Christopher, M., & Peck, H. (2004). *Building the Resilient Supply Chain* (Vol. 15) (No. 2). doi: 10.1108/09574090410700275
- Correia, I., & Melo, T. (2016). Multi-period capacitated facility location under delayed demand satisfaction. *European Journal of Operational Research*, 255(3), 729 - 746. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171630460X> doi: 10.1016/j.ejor.2016.06.039

- Correia, I., & Melo, T. (2017). A multi-period facility location problem with modular capacity adjustments and flexible demand fulfillment. *Computers Industrial Engineering*, 110, 307 - 321. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835217302553> doi: 10.1016/j.cie.2017.06.003
- Darvish, M., Archetti, C., Coelho, L. C., & Speranza, M. G. (2019). Flexible two-echelon location routing problem. *European Journal of Operational Research*, 277(3), 1124 - 1136. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221719303078> doi: 10.1016/j.ejor.2019.04.002
- Dastjerdi, N. K., & Ertogral, K. (2019). A fix-and-optimize heuristic for the integrated fleet sizing and replenishment planning problem with predetermined delivery frequencies. *Computers Industrial Engineering*, 127, 778 - 787. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835218305540> doi: 10.1016/j.cie.2018.11.014
- de Oliveira, P. B., Contreras, I., de Camargo, R. S., & de Miranda Júnior, G. (2020). A comparison of separation routines for benders optimality cuts for two-level facility location problems. *Expert Systems with Applications*, 141, 112928. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417419306463> doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112928>
- Dupont, L. (2008). Branch and bound algorithm for a facility location problem with concave site dependent costs. *International Journal of Production Economics*, 112(1), 245 - 254. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527307001430> (Special Section on Recent Developments in the Design, Control, Planning and Scheduling of Productive Systems) doi: 10.1016/j.ijpe.2007.04.001
- Friggstad, Z., & Salavatipour, M. (2011, 07). Minimizing movement in mobile facility location problems. *ACM Transactions on Algorithms*, 7, 28. doi: 10.1145/1978782.1978783
- Goetschalckx, M., Vidal, C. J., & Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143(1), 1–18. doi: 10.1016/S0377-2217(02)00142-X
- Grazia Speranza, M. (2018). Trends in transportation and logistics. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 830–836. doi: 10.1016/j.ejor.2016.08.032
- Halper, R., Raghavan, S., & Sahin, M. (2015). Local search heuristics for the mobile facility location problem. *Computers Operations Research*, 62, 210 - 223. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054814002512> doi: 10.1016/j.cor.2014.09.004
- Helber, S., & Sahling, F. (2010). A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem. *International Journal of Production Economics*, 123(2), 247–256. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.08.022> doi: 10.1016/j.ijpe.2009.08.022
- Hinojosa, Y., Puerto, J., & Fernández, F. (2000). A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, 123(2),

- 271 - 291. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799002568> doi: 10.1016/S0377-2217(99)00256-8
- Lin, T., Rodríguez, L. F., Shastri, Y. N., Hansen, A. C., & Ting, K. C. (2014). Integrated strategic and tactical biomass-biofuel supply chain optimization. *Bioresource Technology*, 156, 256–266. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.121> doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.121
- Liu, Y., Zhang, Y., Batista, L., & Rong, K. (2019). Green operations: What's the role of supply chain flexibility? *International Journal of Production Economics*, 214(July 2018), 30–43. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.026> doi: 10.1016/j.ijpe.2019.03.026
- Mafakheri, F., & Nasiri, F. (2014). Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions. *Energy Policy*, 67, 116–126. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.071> doi: 10.1016/j.enpol.2013.11.071
- Mao, G., Huang, N., Chen, L., & Wang, H. (2018). Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. *Science of The Total Environment*, 635, 1081 - 1090. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718313482> doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.173
- Marques, A., Rasinmäki, J., Soares, R., & Amorim, P. (2018). Planning woody biomass supply in hot systems under variable chips energy content. *Biomass and Bioenergy*, 108(December 2017), 265–277. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.11.016> doi: 10.1016/j.biombioe.2017.11.016
- Murele, O. C., Zulkafli, N. I., Kopanos, G., Hart, P., & Hanak, D. P. (2020). Integrating biomass into energy supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*, 248. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119246
- Ngan, S. L., How, B. S., Teng, S. Y., Leong, W. D., Loy, A. C. M., Yatim, P., ... Lam, H. L. (2020). A hybrid approach to prioritize risk mitigation strategies for biomass polygeneration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109679. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119308846> doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109679>
- Nunes, L., Causer, T., & Ciolkosz, D. (2020). Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109658. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119308640> doi: 10.1016/j.rser.2019.109658
- Ortiz-Astorquiza, C., Contreras, I., & Laporte, G. (2018). Multi-level facility location problems. *European Journal of Operational Research*, 267(3), 791–805. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.019> doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.019
- Poggi, F., Firmino, A., & Amado, M. (2018, 08). Clusters municipais de bioenergia: um contributo para a prevenção de incêndios florestais. *Finisterra - Revista Portuguesa de Geografia*, 39 - 52. Retrieved from <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci>

- _arttext&pid=S0430-50272018000200003&nrm=iso
- Ponomarov, S. Y., & Holcomb, M. C. (2009). *Understanding the concept of supply chain resilience* (Vol. 20) (No. 1). doi: 10.1108/09574090910954873
- Raghavan, S., Sahin, M., & Salman, F. S. (2019). The capacitated mobile facility location problem. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 507–520. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.055> doi: 10.1016/j.ejor.2019.02.055
- Robert, M., Thomas, A., Sekhar, M., Raynal, H., Casellas, É., Casel, P., ... Bergez, J. É. (2018). A dynamic model for water management at the farm level integrating strategic, tactical and operational decisions. *Environmental Modelling and Software*, 100, 123–135. doi: 10.1016/j.envsoft.2017.11.013
- Rohaninejad, M., Sahraeian, R., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). An accelerated Benders decomposition algorithm for reliable facility location problems in multi-echelon networks. *Computers and Industrial Engineering*, 124, 523–534. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.047> doi: 10.1016/j.cie.2018.07.047
- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 336–349. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.08.002> doi: 10.1016/j.ejor.2009.08.002
- Sanchez, A. M., & Perez, M. P. (2005). Supply chain flexibility and firm performance: A conceptual model and empirical study in the automotive industry. *International Journal of Operations and Production Management*, 25(7), 681–700. doi: 10.1108/01443570510605090
- Sauvey, C., Melo, T., & Correia, I. (2020). Heuristics for a multi-period facility location problem with delayed demand satisfaction. *Computers Industrial Engineering*, 139, 106171. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835219306400> doi: 10.1016/j.cie.2019.106171
- Shekarian, M., Reza Nooraie, S. V., & Parast, M. M. (2019). An examination of the impact of flexibility and agility on mitigating supply chain disruptions. *International Journal of Production Economics*(July), 107438. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.011> doi: 10.1016/j.ijpe.2019.07.011
- Slack, N. (2005). The flexibility of manufacturing systems. *International Journal of Operations and Production Management*, 25(12), 1190–1200. doi: 10.1108/01443570510633594
- Soares, R., Marques, A., Amorim, P., & Rasinmäki, J. (2019). Multiple vehicle synchronisation in a full truck-load pickup and delivery problem: A case-study in the biomass supply chain. *European Journal of Operational Research*, 277(1), 174–194. doi: 10.1016/j.ejor.2019.02.025
- Stevenson, M., & Spring, M. (2007). Flexibility from a supply chain perspective: Definition and review. *International Journal of Operations and Production Management*, 27(7), 685–713. doi: 10.1108/01443570710756956

- Tang, C., & Tomlin, B. (2008). The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *International Journal of Production Economics*, 116(1), 12–27. doi: 10.1016/j.ijpe.2008.07.008
- Tymoszuk, M., Mroczek, K., Kalisz, S., & Kubiczek, H. (2019). An investigation of biomass grindability. *Energy*, 183, 116 - 126. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219310497> doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.167>
- Upton, D. M. (1994). The Management of Manufacturing Flexibility. *California Management Review*, 36(2), 72–89. doi: 10.2307/41165745
- Wang, L., Zhang, Z., Wu, C., Xu, D., & Zhang, X. (2020). Approximation algorithms for the dynamic k-level facility location problems. *Theoretical Computer Science*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304397520302978> doi: 10.1016/j.tcs.2020.05.022
- Yang, Z., Chen, H., Chu, F., & Wang, N. (2019). An effective hybrid approach to the two-stage capacitated facility location problem. *European Journal of Operational Research*, 275(2), 467–480. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.062> doi: 10.1016/j.ejor.2018.11.062