

Fatores Disruptivos e Incerteza na Gestão da Cadeia de Abastecimento

Disruptive Attributes and Uncertainty in Supply Chain Management



Fábio Lopes^a,
Ana Cristina Santos Amaro^b

^a Coimbra Business School | ISCAC – Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Coimbra, Politécnico de Coimbra, a2021106669@alumni.iscac.pt, **ORCID 0009-0003-2484-5817**.

^b Coimbra Business School | ISCAC – Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Coimbra, Politécnico de Coimbra, CEG-IST, CEOS.PP, ISCAP, Polytechnic of Porto, acsamaro@iscac.pt, **ORCID 0000-0001-9906-276X**

Resumo A presente contribuição explora o planeamento da cadeia de abastecimento, através do desenvolvimento de um modelo matemático de otimização, ou artefacto, que compreende a análise do comportamento da cadeia de abastecimento para diferentes cenários de quebra ou disruptão no abastecimento e na procura ou no preço dos produtos. Para o efeito, criou-se a formulação matemática do problema que se implementou utilizando a linguagem de programação Python. Para validar o modelo desenvolvido foi realizada a resolução de um caso prático, relativo ao fabrico de café em cápsula, para o qual são simulados vários cenários de operação da cadeia de abastecimento. Os cenários testados compreendem a operação nos principais elos da cadeia, ou seja, fornecedor, fabricante, distribuidor e retalhista e diferentes cenários de planeamento. Foi utilizada a metodologia Design Science Research na condução das várias etapas de investigação de forma a ser possível avaliar o impacto de fatores disruptivos (abastecimento, entregas, preços, etc.), suas amplitudes (quebras totais, parciais, outras) e durações da ocorrência. O presente trabalho pretende contribuir para um melhor entendimento da cadeia de abastecimento, nomeadamente ao nível da tomada de decisão, e do planeamento da sua operação, em vários contextos e perante diferentes fatores disruptivos.

Palavras-chave Cadeia de Abastecimento, Planeamento, Disrupção, Incerteza, Modelo Matemático, Artefacto.

Abstract This publication explores supply chain planning, through the development of a mathematical optimization model, the artifact, which comprises the analysis of supply chain behaviour for different scenarios of breakdown, interruptions in the supply and in the demand of products. Therefore, a mathematical formulation of the problem was created and implemented using the Python language. To validate the developed model, a practical case was resolved, related to the manufacture of coffee in capsules, for which several supply chain operational scenarios are simulated. The tested scenarios comprise the operation in the supply chain main links, that is, supplier, manufacturer, distributor and retailer, and different planning scenarios. The Design Science Research methodology was used to conduct the various stages of research, in order to be able to evaluate the impact of disruptive factors (supplies, deliveries, prices, etc.), their amplitudes (total, partial breaks, others) and duration of the occurrence. This work aims to contribute to a better understanding of the supply chain, particularly in terms of decision-making and planning of its operation, in various contexts and in the face of different disruptive factors.

Keywords: Supply Chain, Planning, Disruption, Uncertainty, Mathematical Model, Artifact.

Introdução

A gestão da cadeia de abastecimento ou *supply chain management* é uma tarefa cada vez mais complexa e relevante no contexto das ciências empresariais. As várias dimensões da globalização influenciam amplamente as cadeias de abastecimento, nomeadamente através das interações entre entidades sediadas em diferentes partes do mundo. Em períodos não disruptivos, o aumento do fluxo de bens e serviços torna as cadeias de abastecimento mais eficientes (Kamalahmadi & Parast, 2015). No entanto, a gestão de oportunidades económicas conduz frequentemente ao envolvimento em desafios geograficamente mais dispersos, com o consequente aumento da complexidade das operações, e também da exposição das cadeias a fatores de risco, causadores de incerteza. Tais fatores podem decorrer de instabilidades geopolíticas, volatilidade dos mercados, desastres naturais, entre muitos outros que se traduzem num aumento da incerteza e em eventual disruptão do fluxo logístico.

Na verdade, os mercados têm atravessado várias “crises” em resultado nomeadamente de alterações abruptas nos níveis de procura e de consumo, de oscilações nos preços, de quebras no fornecimento de materiais e matérias-primas necessárias ao bom funcionamento das mais diversas atividades de negócio. Existem exemplos bastante recentes de situações com impacto significativo no âmbito das cadeias de abastecimento, de diversos setores de atividade, e que foram sentidas no quotidiano de pessoas e organizações, destaca-se a pandemia COVID-19, em que ocorreu disruptão no abastecimento de inúmeros produtos importados de países asiáticos (principalmente a China), com impactos ainda se verificam atualmente, com os atrasos nas entregas de componentes (com destaque para componentes eletrónicos, entre outros). Destaca-se também o conflito entre Rússia e Ucrânia, com impacto bastante significativo no nosso quotidiano, muito derivado da dependência das importações de cereais, cuja oferta reduziu significativamente, o que por consequência tem gerado aumentos substanciais dos preços destes produtos e seus derivados. Estes acontecimentos mostram-se altamente impactantes no decurso da atividade das empresas e organizações, tornando-se fundamental a preparação e aquisição de novos conhecimentos e métodos que permitam aos responsáveis pela gestão dessas entidades mitigar os impactos de tais acontecimentos.

O presente trabalho tem como objetivo de investigação criar um modelo de planeamento ótimo da cadeia de abastecimento, que permita auxiliar o processo de tomada de decisão em contextos de operação que compreendem fatores disruptivos impactantes na gestão da cadeia. Para tanto, é imperativo alcançar um entendimento dos eventos de quebra e disruptão em cadeias de abastecimento, identificando fatores como a sua origem, o impacto que promovem e eventuais estratégias ou ferramentas que permitam mitigar os efeitos negativos

causados por estes eventos. A investigação levada a cabo procura responder a três grandes questões:

- **Q1.** Como são diferenciados os conceitos de disruptão e de incerteza na CA?
- **Q2.** Que fatores têm uma ação disruptiva na operação da CA?
- **Q3.** Que estratégias de decisão podem ajudar o planeamento da CA em ambiente de incerteza?

A resposta a estas questões guia o desenvolvimento traçado para o trabalho, que se encontra dividido em quatro secções. Assim, após a presente Introdução encontra-se o enquadramento teórico, onde são expostos e explorados os principais conceitos relacionados com o tema em discussão, e de forma a robustecer o trabalho desenvolvido. De seguida, expõe-se a metodologia implementada na realização do trabalho, que contempla a estruturação e implementação da investigação, bem como as principais fontes utilizadas. A secção seguinte relaciona-se com o modelo de planeamento ótimo, nomeadamente a sua caracterização e desenvolvimento da formulação matemática. Por fim, é efetuada uma avaliação e apreciação de alguns dos resultados obtidos, em que se discutem os contextos de operação e se propõem respostas às questões de investigação. O trabalho termina com a exposição das principais conclusões retiradas do estudo, enumerando-se algumas das dificuldades enfrentadas e apresentando-se sugestões para futuros desenvolvimentos.

1. Enquadramento Teórico

A Cadeia de Abastecimento (CA) e gestão da sua operação tem sido objetos de inúmeros estudos compreendendo vários graus de detalhe na caracterização da cadeia e níveis de planeamento que vão desde o operacional, passando pelo tático, até ao estratégico. Para autores como Chopra & Meindl (2016), a origem da CA perde-se no tempo, se se considerar que esta é constituída por todos os elementos envolvidos (direta ou indiretamente) na realização de uma necessidade do cliente. No entanto, as organizações começaram a evidenciar interesse pela CA e pela sua gestão num passado mais recente, ao se aperceberem do potencial impacto, em termos de vantagem competitiva, de uma administração mais eficaz (Christopher, 2011). A sua popularidade e importância têm vindo a crescer, com as organizações a focarem-se tendencialmente mais no sistema em que estão inseridas, ao invés de se focarem apenas no seu negócio de forma individual (Pounder *et al.*, 2013).

No que respeita à composição de uma CA, esta pode ser definida como uma rede de vários intervenientes, ou elos, em que ocorrem fluxos de diferentes âmbitos, de onde se destacam o fluxo de um produto ou serviço, fluxo de informação e fluxo financeiro, desde a sua gênese (enquanto matéria-prima) até ao consumo pelo cliente final, passando por diversos processos

de transformação, deslocação e negociação (Guedes, 2020). Uma das mais antigas definições de *Supply Chain Management* (SCM) foi estabelecida por Oliver & Webber (1982), em que os autores a definem como sendo a gestão do fluxo de bens desde o fornecedor, passando pelas cadeias de produção e distribuição, até chegar ao consumidor final. O *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP, 2013) esta-

beleceu uma definição oficial para a Gestão da Cadeia de Abastecimento, sendo esta uma atividade que envolve o planeamento e gestão de todas as atividades envolvidas no aprovisionamento e aquisições, conversões, gestão logística, e também a coordenação e colaboração com os parceiros (que podem ser fornecedores, intermediários, clientes e outros), de âmbito *intra* e *inter-organizacional*.

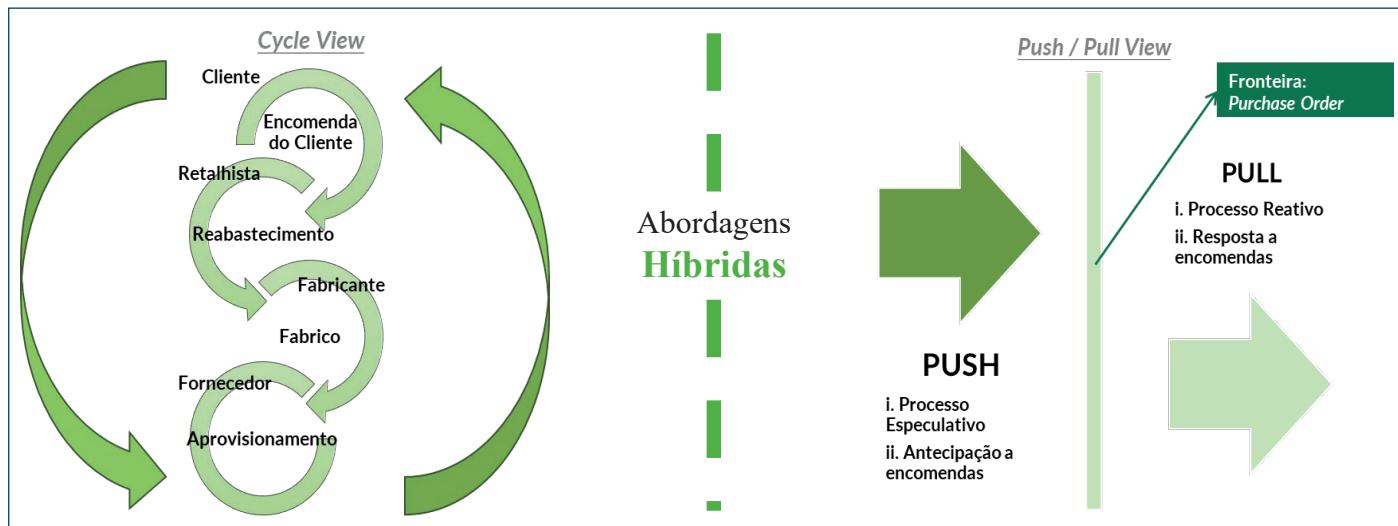


Figura 1. Representação gráfica da perspetiva Cycle View

Fonte: Elaboração Própria.

Globalmente, e tal como se ilustra na Figura 1, têm sido propostas diversas abordagens, destacando-se as visões: *Cycle*, *Push/Pull* e as abordagens híbridas.

A relevância da gestão da cadeia de abastecimento é causada pela possibilidade de as empresas serem capazes de originar benefícios económicos através de eficazes interpretação e gestão da cadeia de abastecimento (New, 1996).

A progressiva redução das margens de lucro, e após os esforços ao nível da personalização dos produtos, da melhoria na qualidade, da redução de custos, entre outros, o foco passou para a gestão da cadeia de abastecimento como uma estratégia para a criação e exploração de vantagem competitiva e financeira (Heizer *et al.*, 2017).

A incerteza e os fatores disruptivos representam ameaças à exploração da vantagem competitiva mencionada, e consequente obtenção do correspondente lucro. A causa do aumento da probabilidade de ocorrência e dos respetivos impactos advém de fatores como a variabilidade na procura dos produtos (motivada por fatores como sazonalidade, mudanças nos hábitos de consumo, etc.), a volatilidade nos preços das matérias-primas, alterações a nível legislativo, problemas de origem produtiva, logística, entre outras. Quanto mais globalizada for a cadeia de abastecimento, maior será a sua exposição a estes fatores, pelo que maior deverá ser a atenção dos responsáveis pela gestão das entidades, pois têm de lidar com operações mais complexas, tais como logística, diferentes regulamentações e barreiras comerciais. Importa, desta forma, mencionar a ocorrência de risco e incerteza, dois

conceitos por vezes considerados sinónimos pelos interlocutores. Em geral a diferenciação destes conceitos decorre da viabilidade ou da incapacidade de obter uma previsão para as ocorrências que lhe estão associadas. De entre os riscos mais impactantes e mais comuns, destacam-se os riscos operacionais, financeiros e riscos associados ao negócio ou setor de atividade em que a entidade se insere.

Outros conceitos associados à gestão da cadeia de abastecimento que têm sido cada vez mais estudados, sendo relevante incluir os seguintes conceitos no âmbito da investigação:

- **Resiliência** - diz respeito à capacidade de adaptação e resposta eficaz da cadeia de abastecimento a alterações e ocorrências imprevistas, o que implica uma rápida reação face à identificação e mitigação de riscos, tornando-se assim um fator essencial para o bom funcionamento da cadeia de abastecimento. De acordo com os trabalhos de Ponomarov & Holcomb (2009) e de Kamalahmadi & Parast, (2015), verifica-se que a resiliência em contexto de gestão da cadeia de abastecimento está relacionada com dois grandes fatores, sendo a capacidade de a entidade, ou a cadeia como um todo, garantir a manutenção da operação em cenários de disruptão sem ser impactada, e também, caso o evento disruptivo impacte a operação, a capacidade desta se reestruturar e recomeçar a operação.

- **Sustentabilidade** - no contexto de cadeia de abastecimento, a sustentabilidade é um tema também cada vez mais abordado, pelo posicionamento geográfico das entidades e também pelas ligações entre os diferentes elos da cadeia.

A operação logística tem um impacto elevado, derivada da necessidade de transportes de grandes distâncias. O tema tem visto a sua relevância e atenção aumentar de forma contínua, verificando-se um aumento das publicações relacionadas, motivadas por fatores como escassez de recursos naturais, aquecimento global, poluição, entre outros (Flores-Sigüenza *et al.*, 2021) being considered as the core of the business function in the 21st century. On the other hand, at present, factors such as the reduction of natural resources, the search for competitive advantages, government laws and global agreements, have generated a greater interest in the sustainable development, which, in order to achieve it, industries need to rethink and plan their supply chain considering a path of sustainability. So sustainable supply chain management emerges as a means to integrate stakeholders' concern for profit and cost reduction with environmental and social requirements, attracting significant interest among managers, researchers and practitioners. The main objective of this study is to provide a synthesis of the key elements of the quantitative model offerings that use sustainability indicators in the design and management of forward supply chains. To achieve this objective, we developed a systematic literature review that includes seventy articles published during the last decade in peer-reviewed journals in English language. In addition a 4 W's analysis (When, Who, What, and Where).

• Sistemas e Tecnologias da Informação - Com a digitalização dos processos, é possível acompanhar a atividade da entidade e saber ao momento em que fase do processo

se encontra o produto. De acordo com Sawik, (2020), na atualidade, uma cadeia de abastecimento é uma rede cyber-física, constituída por múltiplos fornecedores distribuídos globalmente, múltiplas fábricas e centros de distribuição, onde se montam as peças fornecidas e se enviam os produtos para os clientes. De acordo com a tendência atual de *outsourcing*, *offshore* e globalização, a coordenação da tomada de decisões tem um impacto positivo na performance de redes de cadeias de abastecimento de vários níveis em risco de disruptão.

2. Metodologia

A metodologia adotada é o *Design Science Research* (DSR), uma abordagem de investigação que tem como objetivo o desenvolvimento e validação de artefatos, com a finalidade de dar resposta a problemas reais. São várias as publicações que preconizam a implementação desta metodologia, em diversos setores, áreas de conhecimento (Yazdani *et al.*, 2023) e contextos de aplicação (Gregório *et al.*, 2021), resultando dessa forma em abordagens diferenciadas da DSR (Venable *et al.*, 2017).

No presente trabalho, tendo em conta o objetivo da investigação e o propósito de criação de um modelo matemático (o artefato) centrado no problema geral de planeamento ótimo da operação da cadeia, e não na especificidade de um caso organizacional, entendeu-se que a metodologia DSR seria a mais adequada, Figura 2.

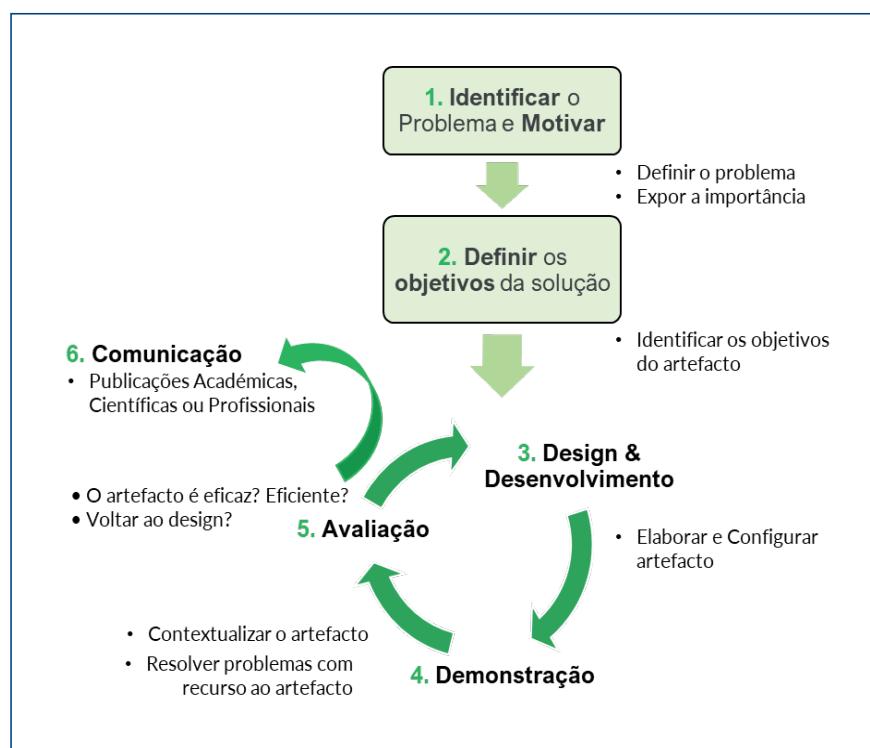


Figura 2.- Etapas da metodologia DSRM

Fonte: Adaptado de Venable, Pries-Heje, & Baskerville (2017)

A DSR está organizada em seis etapas, Figura 2, com diferentes desafios e princípios a respeitar, de modo a garantir o sucesso do estabelecimento desta abordagem. A metodologia prevê uma estrutura cíclica, nomeadamente a partir das atividades de Avaliação (5), podendo retomar-se o *Design & Desenvolvimento* (3), ou até mesmo, exigir uma redefinição dos objetivos da solução, dependendo da causa identificada.

3. Modelo Proposto

Com base na metodologia apresentada na secção anterior, são expostas e desenvolvidas de seguida as três primeiras etapas da metodologia adotada DSR e que correspondem a: 1) Identificação da estrutura de cadeia a ser modelada e motivação para o interesse da mesma; 2) definição do que se pretende da solução a propor; e 3) formulação matemática do problema de planeamento ótimo da CA em contexto de incerteza, ou seja, a criação do artefacto e respetivo desenvolvimento (i.e., *Design* e *Desenvolvimento*).

3.1. Identificação e Motivação

Numa proposta inicial, o modelo considera quatro elos, que correspondem, respetivamente, ao fornecedor, fabricante, distribuidor e retalhista, cada um destes encontrando-se sujeito a várias restrições que resultam de requisitos económicos, de operação ou de recursos de natureza diversa, e também de parâmetros cujos valores afetam diretamente o resultado da operação, tais como constantes associadas aos custos e proveitos da operação em cada elo, com impacto no resultado global de planeamento obtido para a cadeia de abastecimento (adaptado de Amaro & Barbosa-Póvoa, 2011).

3.2. Design & Desenvolvimento

No desenvolvimento do modelo foram assumidos alguns

pressupostos, nomeadamente:

Stock: O stock está definido para cada um dos materiais em uso, s (i.e., matérias-primas, produtos auxiliar, intermédios e acabados), e para cada slot de tempo, t , ou seja, $S_{s,t}$, $\forall s \in S$; $\forall t \in H$. Assim, assume-se que:

- é definido um valor para o stock inicial $S_{s,t=0} = S_s^0$;
- em todo o slot de tempo t , o stock deve obedecer a requisitos mínimos, $S_{s,t}^{\min}$ e/ou máximos, $S_{s,t}^{\max}$, para qualquer dos materiais em uso, s .

Abastecimento Externo: considera-se que, para além das parcerias internas, os elos da cadeia podem ser abastecidos por entidades externas, à exceção do retalhista, cujo funcionamento replica a lógica de central de compras. Estes abastecimentos são representados pelas receções de materiais e estão sujeitos a limites mínimos e/ou máximos, tendo sido implementada uma proposta com características periódicas.

Expedições: para as quantidades expedidas aplica-se uma lógica semelhante à da receção de materiais, nomeadamente através do estabelecimento de limites mínimos e/ou máximos para as unidades expedidas.

Na construção da formulação matemática foi adotada a notação que se passa a apresentar:

Índices

$/$

j , equipamento ou facilidade, $j=1, \dots, J$

s , materiais em uso, compreende matérias-primas, produtos intermédios e produtos acabados, $s=1, \dots, NS$, sendo $NS = NMP + NPI + NPA$;

t , slot de tempo, $t=0, \dots, H+1$

Variáveis de Decisão

As variáveis do modelo de optimização são as quantias em stocks, as quantidades *reacionadas*, *fabricadas*, *expedidas* e *as transportadas* (entre elos da cadeia de abastecimento), em cada slot de tempo, t , estando detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1. Lista de variáveis de decisão do modelo

$S_{s,t}$	- quantia de material s em stock no tempo t
$R_{s,t}$	- quantia de material s recebida no tempo t
$D_{s,t}$	- quantia de material s expedida no tempo t .
$T_{s,v,t}$	- quantia de material s , transportada no veículo v , no tempo t .
$Qp_{s,j,t}$	- quantia de material s produzida no equipamento j , tempo t .
$Qd_{s,t}$	- quantia de material s devolvida no tempo t

Parâmetros

Tabela 2. Lista de parâmetros do modelo

CV_v	- capacidade de carga do veículo v
CF_j	- capacidade de fabrico do equipamento ou facilidade j
CW_k	- capacidade do armazém k
TO_v^{\min}	- quantidade mínima de expedição de material do veículo v
TF_j^{\min}	- quantidade mínima de expedição de material do equipamento ou facilidade j
$R_{s,t}^{\min} / R_{s,t}^{\max}$	- quantias mínima e máxima de material s recebida no tempo t
$D_{s,t}^{\min} / D_{s,t}^{\max}$	- quantias mínima e máxima de material s expedida no tempo t
$S_{s,t}^{\min} / S_{s,t}^{\max}$	- quantias mínima e máxima de stock s no tempo t
pv_s	- preço de venda do material s
Ca_s	- custo de aquisição do material s
Cw_s	- custo de armazenamento do material s
Ct_s	- custo de transporte do material s
Cd_s	- custo de devolução (e eventual reinserção) do material s
r_s^T	- Medida de ocupação do material s (volume, peso, número de unidades etc.)
r_s^P	- Taxa de consumo/ produção do material s (% rácio, etc.)
$\% W_s^{\min} / W_s^{\max}$	- percentagens mínima e máxima de material s em armazém

Foi modelado um enquadramento de quatro elos (i.e., fornecedor, fabricante, distribuidor e retalhista), e considerados eventos de armazenagem, de processamento e fabrico (i.e., transformação de matérias-primas em produtos acabados, mediante diferentes fatores de conversão, desperdícios, etc.), operações de transporte (i.e., interações entre os elos da cadeia), e a logística inversa (i.e., devoluções). Para cada um

destes eventos foi estabelecida a parametrização das operações conforme notação apresentada na Tabela 3. A função objetivo adotada é a maximização de proveitos associados à operação dos vários elos da cadeia de abastecimento (Lopes, 2024). Assim, considerando a notação adotada, a função objetivo pode ser traduzida da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 Maz z: z = & \sum_t \sum_s pv_s D_{s,t} + \sum_s pv_s (S_{s,H} - S_{s,0}) \\
 & - \sum_t \sum_s Ca_s R_{s,t} - \sum_t \sum_s Cw_s S_{s,t} - \sum_t \sum_v \sum_s Ct_s T_{s,v,t} \\
 & - \sum_t \sum_j \sum_s Cp_s Qp_{s,j,t} - \sum_t \sum_s Cd_s Qd_{s,t}
 \end{aligned} \tag{1}$$

A expressão da função objetivo (1) comprehende o somatório de todas as receitas obtidas através da entrega ou expedição dos materiais, nas várias localizações e instantes de tempo

(i.e., 1^a parcela), e ainda os valores resultantes da diferença de quantias em posse dos vários materiais nos instantes final e inicial do período de planeamento (i.e., 2^a parcela). A esses

valores há que deduzir os vários custos gerados nesses períodos nomeadamente, custos de aquisição, de armazenamento e de transporte dos materiais, (i.e., 3^a, 4^a e 5^a parcelas de (1)), e os custos de produção e de devolução de materiais, nos vários períodos de tempo (i.e., 6^a e 7^a parcelas de (1)).

No âmbito do modelo desenvolvido foram estabelecidas diversas restrições resultantes nomeadamente do Balanço de existências (2), dos Stocks (3) e (4), das Receções (5), das Expedições (6) e das Capacidades das várias facilidades envolvidas (7) e (8).

$$\begin{aligned}
 S_{s,t} = S_{s,t-1} + R_{s,t} + \sum_{v \in V_{v,s}^{in}} r_s^T T_{s,v,t} + \sum_{j \in J_{j,s}^{in}} r_s^P Q p_{s,j,t} - D_{s,t} - \sum_{v \in V_{v,s}^{out}} r_s^T T_{s,v,t} \\
 - \sum_{j \in J_{j,s}^{out}} r_s^P Q p_{s,j,t}
 \end{aligned}
 \quad \forall s \in S; \forall t = 1, \dots, H + 1 \quad (2)$$

As equações (2) representam o balanço de materiais, s , em cada *slot* de tempo, t . Esta relação atende aos stocks existentes no *slot* de tempo anterior, aos quais adiciona as quantias rececionadas de material s , nesse *slot* de tempo, $R_{s,t}$, acrescidos de todos os transportes que trazem quantias de material s , $\sum_{v \in V_{v,s}^{in}} r_s^T T_{s,v,t}$ e ainda das quantidades fabricadas de s , nesse

slot de tempo t , $\sum_{j \in J_{j,s}^{in}} r_s^P Q p_{s,j,t}$. Ao valor apurado destas operações são descontadas as quantias expedidas de material s , em cada *slot* de tempo t , $D_{s,t}$ e as quantias deduzidas por transporte do material, $\sum_{v \in V_{v,s}^{out}} r_s^T T_{s,v,t}$, ou pelo seu consumo nas operações de fabrico, $\sum_{j \in J_{j,s}^{out}} r_s^P Q p_{s,j,t}$.

Tabela 3– Restrições de capacidade nas entidades do modelo (adaptado de Amaro & Barbosa-Póvoa, 2011).

Stocks

$$\sum_{s \in W_k} S_{s,t} \leq CW_k \quad \forall t; \forall k \in K; \forall t \quad (3)$$

Estas condições traduzem o facto de, em cada *slot* de tempo t , o total de materiais s no armazém k , W_k , não poder ultrapassar a capacidade desse armazém, CW_k . Adicionalmente, podem ser impostos limites mínimo e máximo, em cada *slot* de tempo t , e para cada material, s , de acordo com as percentagens W_s^{min} e W_s^{max} de capacidade do armazém k , CW_k , afetas a cada material:

$$\%W_s^{min}CW_k \leq S_{s,t} \leq \%W_s^{max}CW_k \quad \forall k \in K; \forall s \in W_k; \forall t \quad (4)$$

Abastecimentos ou Receções

$$R_{s,t}^{min} \leq R_{s,t} \leq R_{s,t}^{max} \quad \forall s \in S; \forall t \quad (5)$$

Estas condições mostram que, em cada *slot* de tempo, t , e para cada material, s , o total rececionado, está sujeito a quantidades mínimas, $R_{s,t}^{min}$, e máximas, $R_{s,t}^{max}$.

Expedições ou Entregas

$$D_{s,t}^{min} \leq D_{s,t} \leq D_{s,t}^{max} \quad \forall s \in S; \forall t \quad (6)$$

Estas condições indicam que, em cada *slot* de tempo, t , e para cada material, s , o total de materiais expedidos, está sujeito a limites mínimos, $D_{s,t}^{min}$, e máximos, $D_{s,t}^{max}$.

Processamento / Fabrico

$$CF_{s,j,t}^{min} \leq Qp_{s,j,t} \leq CF_{s,j,t}^{max} \quad \forall s \in S; j \in J_s^{out}; \forall t \quad (7)$$

Estas condições garantem que, em cada *slot* de tempo, t , para cada equipamento ou facilidade, j , e para cada material, s , a quantidade fabricada/ processada, está sujeita às capacidades mínimas, $CF_{s,j,t}^{min}$, e máximas, $CF_{s,j,t}^{max}$ definidas.

Transporte

$$T_{s,v,t}^{min} \leq T_{s,v,t} \leq T_{s,v,t}^{max} \quad \forall s \in S; \forall v \in V; \forall t \quad (8)$$

Estas condições asseguram que, em cada *slot* de tempo, t , para cada veículo, v , e para cada material, s , a quantidade transportada pelo veículo, está sujeita às capacidades mínimas, $T_{s,t}^{min}$ e máximas, $T_{s,t}^{max}$ de transporte.

Fonte: Elaboração Própria

O modelo elaborado foi depois implementado com recurso à linguagem de programação *Python*. Através das bibliotecas desta linguagem é possível ter acesso a diferentes solvers que permitem resolver o modelo de otimização. A implementação do modelo em *Python* abre boas oportunidades de personalização e adaptabilidade a diferentes realidades a modelar, seja através da inclusão de novos elos, de novos eventos e instâncias, ou a alteração de parâmetros de operação, limites/referências, entre muitas outras opções.

4. Cenários de Planeamento da Cadeia

Em conformidade com as etapas da metodologia DSR, uma vez desenvolvido o modelo (artefacto) procede-se para as etapas de *Demonstração* e de *Avaliação* (i.e., fases 4 e 5). Para tanto, explicita-se o contexto de implementação e apresenta-se a

resolução do problema utilizando o modelo criado. Depois dessa etapa avalia-se a eficácia e eficiência do artefacto quanto à resolução do problema. Esta *Avaliação* é realizada para vários cenários de forma a permitir validar o desempenho do modelo e concluir quanto à necessidade de retomar a etapa de *Design & Desenvolvimento* para reformular ou reestruturar algum dos itens considerados.

Assim, na primeira seção caracteriza-se o contexto industrial de aplicação e a sua parametrização, passando-se depois à análise dos resultados obtidos com a implementação do modelo.

4.1. Demonstração – Contexto de aplicação

O contexto de uso do artefacto envolve um caso ficcionado, na área da indústria de fabrico de café embalado em cápsula. O processo de fabrico das cápsulas de café tem várias etapas, nomeadamente operações de *mistura* dos diferentes tipos de grãos de café, a *moagem* de grãos de café, o *enchimento* das cápsulas (preparação/fabrico das cápsulas, enchimento e selagem das mesmas), e ainda a *embalagem* e rotulagem, Lopes (2024).

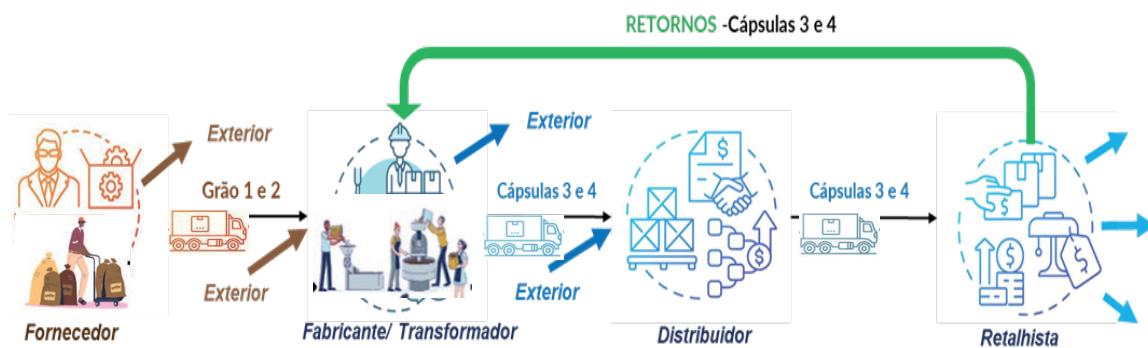


Figura 3. Ilustração dos elos da cadeia e dos abastecimentos/ expedições do/para o exterior.

Para o caso em estudo consideram-se duas misturas de café, que são embaladas e comercializadas em cápsula (cápsula 3 e cápsula 4), fabricadas a partir de dois tipos de grãos de café distintos (grão 1 e grão 2), fazendo-se variar as percentagens de cada grão na mistura. A Figura 3 ilustra simbolicamente a cadeia de abastecimento apreciada.

O modelo considera um racional de escala de tempo agregada, compreendendo 54 *slots* de tempo, o que corresponde a um referencial temporal de um ano, 52 semanas, acrescido de duas semanas adicionais (i.e., a semana que antecede o ano observado, e a semana que inicia o ano seguinte), por forma a não comprometer a continuidade dos fluxos e o efeito do *cut-off* de operações, (Lopes, 2024; Amaro & Barbosa-Póvoa, 2005).

Em termos de parametrizações, para cada um dos elos da cadeia de abastecimento foram previamente estabelecidos os pressupostos de operação e respetivos constrangimentos, foram identificados os parâmetros e coeficientes associados às variáveis do modelo, e traduzida a formulação das restrições do problema. São ainda definidos os períodos de quebras de fornecimento de matérias-primas, de produtos acabados ou de embalagens.

4.2. Avaliação

Por questões de espaço, foram selecionados dois cenários de operação, para os quais se ilustra o planeamento da cadeia em operação regular (i.e., sem ocorrência de quebras de abaste-

cimento) e após a introdução das quebras definidas. Importa desde logo notar que o modelo vai otimizar o planeamento das operações tendo por base o conhecimento *a priori* dos períodos de ocorrência de quebras no abastecimento. Desta forma, o *solver* vai procurar uma solução que atenda a essas ocorrências, promovendo alterações nas várias operações, de modo a otimizar as tarefas de planeamento, no horizonte de tempo definido.

Importa ainda mencionar que, nestes cenários de avaliação foram relaxados os limites mínimos de expedições para os clientes e máximos de capacidade no fornecedor, mantendo-se inalteradas as restantes restrições.

Quebra de Matéria-Prima no Fornecedor

Neste caso compara-se, respetivamente, a operação em contexto de funcionamento regular com os resultados obtidos após interrupção de abastecimento de grão 1 no elo do fornecedor, Figura 2, e o cenário equivalente para o grão 2, Figura 3. Tratando-se de um elo totalmente dependente da matéria-prima, grão 1 e grão 2, é expectável que esta quebra origine um importante impacto na operação do fornecedor e, consequentemente, nos demais elos da cadeia. Como é possível observar nessas figuras, para ambos os grãos de café, o modelo de planeamento apresenta uma solução que responde à quebra com um crescente acumulado de *stock*, que não se regista em situação regular de abastecimento, pois isso significaria um significante aumento dos custos

afetos às existências.

Desta forma verifica-se que o modelo começa a acumular stock de grão 2 numa fase mais inicial que para o grão 1, pelo facto de as condições de abastecimento serem mais restritivas. A capacidade de armazenamento das matérias-primas no fornecedor mostra-se fundamental para que seja possível manter

os compromissos de entrega durante o período de quebra. Adicionalmente, conclui-se que, a empresa necessaria de um tempo de resposta de cerca de 14 e 29 semanas para fazer face a um período de carência próximo de dois meses (i.e., 8 slots de tempo), de grão 1 e 2, respetivamente.

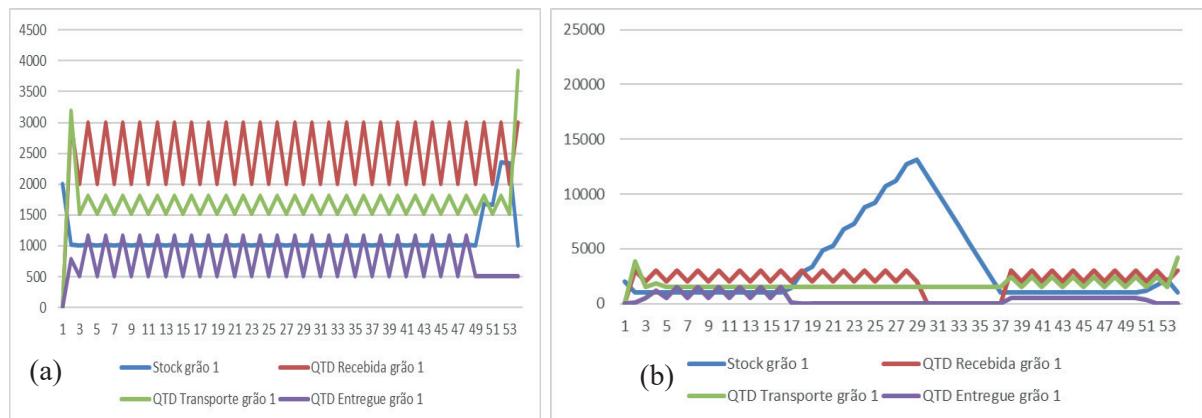


Figura 2- Evolução no tempo da matéria-prima grão 1 no fornecedor, em cenário (a) regular e (b) quebra.

Fonte: Elaboração própria

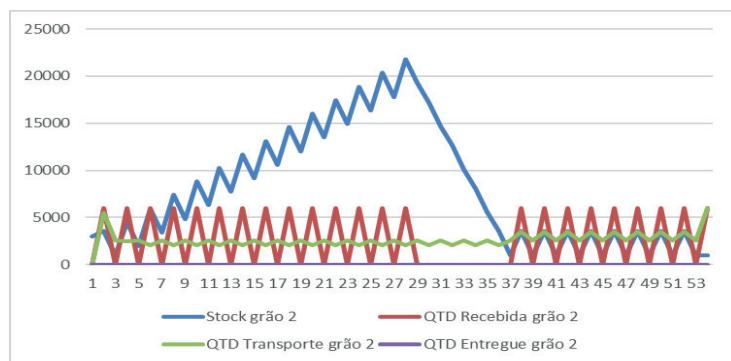


Figura 3 - Evolução no tempo da matéria-prima grão 2 no fornecedor, em cenário de quebra.

Fonte: Elaboração Própria

Nos elos a jusante, o impacto imediato verifica-se no fabricante que, apesar dos stocks acumulados no fornecedor, reduz a capacidade de transformação do café em grão para cápsula, em resultado da capacidade/ tempo de transporte necessário. Essa situação mantém-se até ao momento de retoma da normal atividade, aumentando as quantidades comercializadas assim que ocorre a operação é estabilizada a montante. Já no distribuidor e no retalhista o comportamento é semelhante, verificando-se em ambos uma diminuição da atividade quando o fabricante retrai as suas entregas, existindo um aumento significativo de atividade assim que a operação nos elos precedentes estabiliza.

Quebra de Matéria-Prima no Fabricante

No caso de quebra de matéria-prima no elo do Fabricante verifica-se, tal como anteriormente, uma tendência para acumular stocks, acompanhada de uma prática de diminuição de expedições, até à normalização da atividade a montante, Figura 4. Assim que esta ocorre, verifica-se um fabricante significativo de produto (i.e., são trabalhadas quantidades elevadas) que, à semelhança dos stocks, é viabilizado pela relaxação da restrição de capacidade. No fornecedor, elo a montante na CA verifica-se, na fase inicial da quebra, um aumento das quantidades expedidas para os clientes externos, invertendo-se a tendência assim que termina a quebra no abastecimento, a partir da qual se gera a necessidade de aumentar os stocks para dar resposta às necessidades do fabricante.

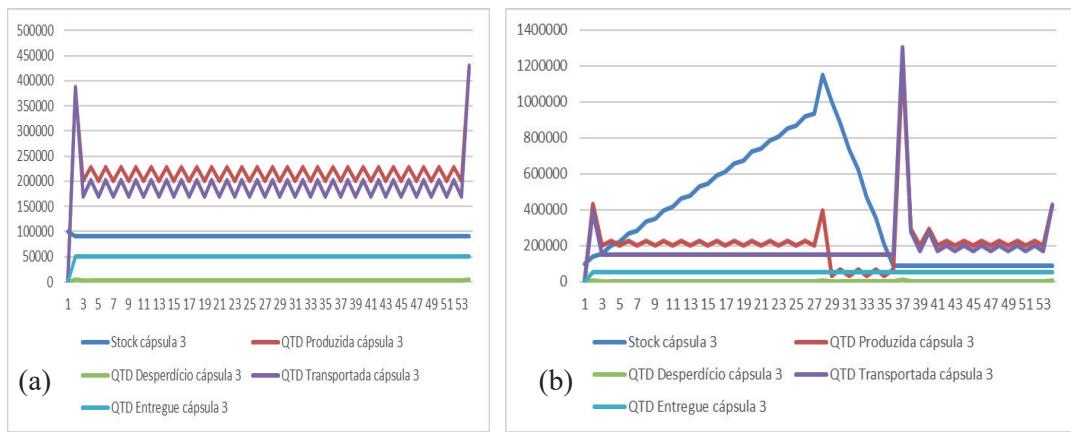


Figura 4. Evolução no tempo do produto cápsula 3, no cenário (a) “regular” e (b) de quebra no fabricante.

Fonte: Elaboração própria

Nos elos correspondentes ao distribuidor e ao retalhista verifica-se, antes da ocorrência dessa interrupção no abastecimento ao fabricante, que as quantidades trabalhadas são ligeiramente inferiores, existindo um pico de atividade correspondente à ocorrência no fabricante, estabilizando depois para o registo normal, ainda que com quantidades superiores às trabalhadas antes da quebra. Até ao *terminus* da quebra as quantidades trabalhadas são relativamente baixas, por forma a garantir a continuidade da operação.

Relativamente aos demais cenários testados deixa-se uma nota de destaque para o efeito chicote (i.e., a ampliação do efeito de variabilidade na procura do consumidor final que se propaga em direção a montante da cadeia de abastecimento), na solução apresentada pelo modelo, para quebras no retalhista ao nível do produto acabado. O facto de ser conhecido o momento da quebra ou disruptão permite, ainda assim, que o modelo atenda a essas ocorrências, antecipando ações que permitam mitigar o efeito da quebra.

Em teoria, a alteração sentida a jusante causa um efeito de amplificado (i.e., chicote) nos elos a montante, cuja amplitude aumenta de acordo com o distanciamento ao consumidor final. Como o elo não possui toda a informação necessária para a alteração da procura, propaga o efeito ao elo anterior, e assim sucessivamente.

forma a testar e desenvolver diferentes cenários, sendo os resultados obtidos sujeitos a comparação e avaliação. A aplicabilidade da ferramenta tem como propósito o auxílio à tomada de decisão na gestão da cadeia de abastecimento, sendo a sua utilidade associada ao acompanhamento do plano de operação para os diferentes parceiros da cadeia. A sua adaptabilidade permite uma simples integração em diferentes setores de atividade, consoante as necessidades específicas do ambiente em que ocorre a implementação. Para uma eficaz gestão da cadeia de abastecimento, é fundamental um planeamento eficaz e capaz de responder a eventos que afetem o normal decurso da atividade ao longo da cadeia. Relativamente às questões de investigação importa referir, em resposta à ‘**Q11. Como são diferenciados os conceitos de disruptão e de incerteza na CA?**’, que os conceitos se diferenciam através da *tipologia* de ocorrência, da diversidade de *causas* e/ou *acontecimentos* que podem promover, e da probabilidade de ocorrência desses eventos. Assim, identificam-se situações na cadeia de abastecimento que representam desde contextos de risco de quebra até situações mais incertas de disruptão. O artefacto de planeamento irá incorporar no modelo essas ocorrências e determinar os resultados que otimizam o objetivo de planeamento, económico no caso analisado, refletindo as ações a adotar nos vários processos e operações. A capacidade de antecipar essas alterações e variabilidades associada aos eventos modelados permite à cadeia criar mecanismos de resposta para mitigar os efeitos de ocorrências que desviam a cadeia das condições regulares de operação, tal como foi possível percecionar nos cenários ilustrados. Considerando o panorama de globalização da CA, que amplia a complexidade operacional e aumenta a exposição a eventos desfavoráveis, e em resposta à ‘**Q12. Que fatores têm uma ação disruptiva na operação da CA?**’, conclui-se que as diferentes dimensões de sustentabilidade económica, ambiental, social, bem como o contexto geopolítico e cultural, podem gerar ocorrências com diferentes tipologias de ação sobre a cadeia, e com efeitos mais ou menos disruptivos na sua operação. Por fim, e em resposta à ‘**Q13. Que estratégias**

5. Conclusão

O presente trabalho teve como principal objetivo a criação de um artefacto, com a finalidade de analisar os impactos de eventos disruptivos e também de quebras e incerteza associadas à normal atividade de uma cadeia de abastecimento. Para o efeito, através da metodologia *Design Science Research*, o ponto de partida prendeu-se com a elaboração de um modelo matemático de otimização, desenvolvido para uma cadeia de abastecimento genérica, e implementado em ambiente de linguagem de programação *Python*, através de uma adaptação teórico-prática a uma cadeia de abastecimento específica, por

de decisão podem ajudar o planeamento da CA em ambiente de incerteza?, os modelos de otimização permitem, em vários contextos, apoiar e melhorar a tomada de decisão em qualquer dos elos da cadeia, pelo que o investimento em soluções que permitam tomar decisões mais integradas no contexto do planeamento da CA revelam-se determinantes para uma adequada estratégia de decisão em ambiente de incerteza. Como sugestões para trabalhos futuros, importa referir a importância da implementação do modelo em casos de estudo reais, por forma a analisar e avaliar o artefacto com base em dados provenientes da atividade efetiva. Adicionalmente, considera-se que será oportuno incorporar no desenho do artefacto outras perspetivas de operação da cadeia e ainda melhorar a forma de representação dos eventos de quebra ou de disruptão, o seu risco, e a sua probabilidade de ocorrência.

Referências Bibliográficas

- Amaro, A.C.S. & Barbosa-Póvoa, A.P.F.D. (2005). Optimal scheduling of supply chains: A new continuous-time formulation, Computer Aided Chemical Engineering, 20, Elsevier, 1171-1176. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(05\)80037-9](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(05)80037-9).
- Amaro, A.C.S. & Barbosa-Póvoa, A.P.F.D. (2011). Supply chains planning with reverse flows: optimal alternative time formulations, Industrial & Engineering Chemistry Research, 50 (9), ACS Publications, 5005-5022. <https://doi.org/10.1021/ie101416q>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2016). Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation (6^a ed.). Pearson Education.
- Christopher, M. (2011). Logistics & Supply Chain Management (4. ed). Financial Times, Prentice Hall.
- Flores-Sigüenza, P., Marmolejo-Saucedo, J. A., Niembro-Garcia, J., Lopez-Sánchez, V. M., Flores-Sigüenza, P., Marmolejo-Saucedo, J. A., Niembro-Garcia, J., & Lopez-Sánchez, V. M. (2021). A systematic literature review of quantitative models for sustainable supply chain management. Mathematical Biosciences and Engineering, 18(3), Artigo mbe-18-03-111. <https://doi.org/10.3934/mbe.2021111>
- Gregório, J., Reis, L., Peyroteo, M., Maia, M., da Silva, M.M. & Lapão, L.V. (2021). The role of Design Science Research Methodology in developing pharmacy eHealth services, Research in Social and Administrative Pharmacy, 17 (12), Elsevier, 2089-2096. <https://doi.org/10.1016/j.sapharm.2021.05.016>
- Guedes, A. P. (2020). Gestão da Cadeia de Abastecimento. Em Logística e Gestão da Cadeia de Abastecimento (3^a ed., pp. 65–120). Edições Sílabo.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2017). Principles of Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management (10^a ed.). Pearson Education.
- Kamalahmadi, M., & Parast, M. M. (2015). A review of the literature on the principles of enterprise and supply chain resilience: Major findings and directions for future research. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.10.023>
- Lopes, F.M.D. (2024). Fatores Disruptivos e Incerteza na Gestão da Cadeia de Abastecimento, Dissertação de Mestrado em Gestão Empresarial, CBS-ISCAC/ IPC.
- New, S. J. (1996). A framework for analysing supply chain improvement. International Journal of Operations & Production Management, 16(4), 19–34. <https://doi.org/10.1108/01443579610114059>
- Oliver, R. K., & Webber, M. (1982). Supply-chain management: Logistics catches up with strategy. Outlook, 5(1), 42–47.
- Ponomarov, S. Y., & Holcomb, M. C. (2009). Understanding the concept of supply chain resilience. The International Journal of Logistics Management, 20(1), 124–143. <https://doi.org/10.1108/09574090910954873>
- Pounder, P., Bovell, G., & Pilgrim-Worrell, S. (2013). A Review of Supply Chain Management and Its Main External Influential Factors. Supply Chain Forum, 14, 42–50. <https://doi.org/10.13140/2.1.3787.3289>
- Venable, J. B., Pries-Heje, J. R., & Baskerville, J. (2017). Choosing a Design Science Research Methodology. Em Australia Choosing a Design Science Research Methodology (Vol. 2). APA.
- Sawik, T. (2020). Supply Chain Disruption Management Using Stochastic Mixed Integer Programming (2^a ed.). Springer Cham.
- Yazdani, M., Loosemore, M., Mojtabaei, M., Sanderson, D. & Haghani, M. (2023). An integration of operations research and design science research methodology: With an application in hospital disaster management, Progress in Disaster Science, 20, Elsevier, 100300. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100300>