

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Renato Bruno Parreira

**Proposta de Framework para o Planejamento Integrado da Cadeia de
Suprimentos na Indústria 4.0**

Florianópolis

2020

Renato Bruno Parreira

**Proposta de Framework para o Planejamento Integrado da Cadeia de
Suprimentos na Indústria 4.0**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia de produção civil do Centro Tecnológico da
Universidade Federal de Santa Catarina como requisito
para a obtenção do Título de Engenheiro Civil
Orientador: Prof. Dr. Enzo Morosini Frazzon

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Parreira, Renato

Proposta de Framework para o Planejamento Integrado da
Cadeia de Suprimentos na Indústria 4.0 / Renato Parreira
; orientador, Enzo Morosini Frazzon, 2021.

71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Produção Civil, Florianópolis,
2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Civil. 2. Cadeia de
Suprimento. 3. Indústria 4.0. 4. Otimização baseada em
Simulação. I. Morosini Frazzon, Enzo. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de
Produção Civil. III. Título.

Renato Bruno Parreira

**Proposta de Framework para o Planejamento Integrado da Cadeia de Suprimentos na
Indústria 4.0**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado e
aprovado, em sua forma final, pelo curso de Graduação em Engenharia de Produção Civil, da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de maio de 2021.

Prof. Mônica Maria Mendes Luna, Dr.^a
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr. -Ing.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Faria Giglio, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Ícaro Romulo Sousa Agostino, M.Sc
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus amigos, minha família e aos professores que fizeram parte da minha formação no início de tudo na minha cidade (Porto Velho, RO).

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família que sempre me acolheu e auxiliou da maneira que foi possível, em especial meus tios Sandro e Viviane. A todos os amigos que fiz ao longo do caminho, todos foram importantes em algum momento e de alguma maneira possibilitaram com que eu chegasse até aqui. A minha namorada Flávia que sempre me motivou e apoiou.

Ao professor Enzo por me orientar na realização desse trabalho e me oferecer a oportunidade de ser parte do ProLogIs. Aos meus amigos do ProLogIs, em especial Djonathan, Matheus, Ícaro e Yuri que foram de grande importância para a realização desse trabalho.

Um agradecimento especial a todos os professores que passaram pela minha vida até agora, que de alguma forma contribuíram para meu crescimento e que sem os quais esse trabalho não seria possível. A UFSC, que me proporcionou uma oportunidade de aprendizado única, amizades para uma vida toda e memórias que levarei para o resto da vida.

Aos meus professores e orientadores na Somerville High School e aos amigos que fiz lá, em especial, minha amiga Verônica Valadares que me motivou a buscar novos desafios, o que me ajudou na escolha da minha graduação.

RESUMO

A ideia de empresar atuando separadamente tem evoluído para uma visão mais ampla e holística, onde empresas trabalham em conjunto para obter competitividade no mercado. O planejamento integrado da cadeia de suprimentos tem o potencial de retornar ótimos globais e consequentemente gerar vantagens competitivas em relação a empresas que planejam duas operações considerando cada etapa da cadeia separadamente. Além disso, as tecnologias e conceitos da indústria 4.0 podem tornar esses modelos de planejamento mais reais e palpáveis. Este trabalho apresenta uma revisão sistemática de literatura para identificar o foco das pesquisas que envolvem o planejamento integrado de cadeias de suprimentos, quais são os métodos propostos para abordar problemas tão complexos, como os autores estão lidando com as incertezas dos sistemas reais e como os conceitos da indústria 4.0 tem impactado essas pesquisas. Em seguida, um framework de um sistema híbrido de otimização e simulação para o planejamento integrado de cadeias de suprimentos é proposto baseando-se no que foi observado nos artigos analisados na revisão de literatura. O framework proposto tem por objetivo tornar o planejamento de cadeias de suprimentos mais eficientes e flexíveis obtendo responsividade à eventos dinâmicos e imprevistos.

Palavras-chave: Planejamento e Controle. Gestão da Cadeia de Suprimentos. Otimização Baseada em Simulação.

ABSTRACT

The idea of companies working separately has been evolving to a more broad and holistic view, in which companies work together to obtain competitiveness in the market. Integrated supply chains planning and control has the potential to return global optimum and consequently generate advantages over the competitors that plan their operations considering each step separately. In addition, industry 4.0 technologies and concepts can make these planning models more real and tangible. This paper presents a systematic review of the literature to identify the focus of research involving integrated supply chain planning, what methods are proposed to address such complex problems, how the authors are dealing with the uncertainties of real the world and how industry 4.0 concepts has impacted the research. Then, a framework for a hybrid optimization and simulation approach for integrated supply chain planning is proposed based on what was observed in the articles analyzed in the literature review. he proposed framework aims to make supply chain planning more efficient and flexible, obtaining responsiveness to dynamic and unforeseen events.

Keywords: Planning and Control. Supply Chain Management. Simulation Based Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cadeia de Suprimentos	25
Figura 2: Fases do planejamento e controle da cadeia de suprimentos.....	31
Figura 3: Visão geral da abordagem proposta.....	37
Figura 4: Enquadramento metodológico	38
Figura 5: Fluxograma PRISMA	44
Figura 6: Processos abordados	54
Figura 7: Fluxograma do algoritmo genético	57
Figura 8: Fluxograma do sistema de otimização baseada em simulação	60
Figura 9: Framework de otimização baseada em simulação.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios de inclusão e exclusão de documentos	42
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	DELIMITAÇÕES	19
1.4	ESTRUTURA	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	INDÚSTRIA 4.0	20
2.1.1	Sistemas Ciber-Físicos (SCF)	21
2.1.2	Internet das coisas:	22
2.1.3	Internet dos serviços:	22
2.1.4	Fábricas Inteligentes	22
2.2	PLANEJAMENTO E CONTROLE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	24
2.2.1	Planejamento da Cadeia de Suprimentos	28
2.2.2	Controle da Cadeia de Suprimentos	31
2.3	OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO	34
3	METODOLOGIA	38
3.1	ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	38
3.2	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	39
3.3	PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA	40
3.3.1	Coleta de Artigos	40
3.4	SELEÇÃO DE DOCUMENTOS	41
5	RESULTADOS	45
5.1	ANÁLISE DE CONTEÚDO	45
5.1.1	Desenvolvimento de abordagens eficientes	45

5.1.2	Dinamicidade e flexibilidade	48
5.1.3	Impactos da indústria 4.0	51
5.1.4	Quais as oportunidades de pesquisas futuras apontadas pelos autores?	51
6. PROPOSTA DE FRAMEWORK PARA PLANEJAMENTO INTEGRADO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS.		52
6.1	PARÂMETROS E ABRANGÊNCIA.....	53
6.2	SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS.....	55
6.3	ESCOLHA DE ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO.....	55
6.4	MIP.....	58
6.5	PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO DA METODOLOGIA HÍBRIDA.....	58
7.	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

As redes de manufatura modernas consistem em unidades de produção globalmente distribuídas e ligadas através do fluxo financeiro, de materiais e de informações. Cadeias de suprimentos (CS) abrangem um grande número de processos de materiais e informações ligando o fornecimento, produção e distribuição de produtos ou serviços, cruzando as fronteiras das organizações, agregando valor para clientes e outras partes interessadas (PIRES ET AL. 2018). A maior complexidade do produto, ciclos de vida mais curtos e incertezas com relação a demanda são os desafios enfrentados pelos diversos atores que interagem dentro das cadeias de suprimentos para atingir suas metas de custos (LIOTTA ET AL. 2016). Como uma evolução natural derivada de um ambiente cada vez mais competitivo, as empresas devem interagir, planejar e agir para além de seus processos internos (KHAN ET AL., 2014). A visão de companhias atuando isoladamente tem sido substituída pela visão da companhia como parte de uma rede complexa que deve atuar com coordenação e sincronia para se manter competitiva e garantir sua fatia de mercado (CHAE ET AL., 2014). Cadeias de suprimentos com estruturas cada vez mais complexas inseridas em ambientes dinâmicos necessitam de responsividade e produtividade nas quais sistemas e recursos são aplicados tão eficientemente quanto possível (FRAZZON ET AL. 2018).

A inovação tecnológica e as demandas dos clientes têm levado o cenário industrial a diversos desafios e oportunidades de avanços, sendo este novo cenário considerado a nova revolução industrial, comumente denominada indústria 4.0 (BARRETO ET AL. 2017). A nova revolução é impulsionada pela possibilidade de um nível mais alto de comunicação entre pessoas, máquinas e recursos, baseada em três componentes principais: Internet das Coisas (IoT), Sistemas Cyber Físicos (SCF) e Fábricas Inteligentes, todos eles possíveis através do uso de RFID, sensores, atuadores e redes de comunicação (HERMANN ET AL., 2015). Pereira et al. (2018) descreve a indústria 4.0 como sendo a integração entre sistemas cyber físicos e internet das coisas dentro das cadeias de suprimentos. Esta revolução no setor certamente terá efeitos positivos na forma de gerenciar o fluxo de materiais e informações, estendendo os avanços para a perspectiva da logística e da cadeia de suprimentos (BARRETO ET AL. 2017).

A aplicação de tecnologias da indústria 4.0 podem levar a inovações dentro das cadeias de suprimentos e resolver problemas como assimetria de informações (MAIER ET AL., 2015).

Visando obter maior competitividade, o planejamento da cadeia de suprimentos é um importante fator para eficiência e alguns autores já exploraram as oportunidades proporcionadas pela quarta revolução industrial. Dentro desse cenário a metodologia híbrida de otimização e simulação tem se mostrado promissora para lidar com cadeia de suprimentos complexas e atingir maior competitividade. Os desafios das cadeias de suprimentos dinâmicas podem ser abordados usando otimização baseada em simulação e tecnologias da indústria 4.0 (PIRES ET AL. 2018). Esta abordagem é capaz de lidar com sistemas complexos e ao mesmo tempo considerar ambientes dinâmicos com comportamento estocástico (PIRES ET AL. 2018). Ainda, segundo Liotta et al. (2016), a abordagem de otimização baseada em simulação é capaz de lidar com a complexidade de cenários estendidos levando em consideração a dinâmica dos sistemas e obtendo soluções próximas da solução ótima em um tempo computacional viável.

Na literatura recente pode-se se identificar um esforço para o planejamento integrado da cadeia de suprimentos a fim de otimizar a estratégia e a sincronização. No entanto existem duas barreiras principais para a integração: (I) a disponibilidade de dados para desenvolver e executar os modelos de planejamento, e (II) a capacidade computacional para lidar com o cenário estocásticos, dinâmico e complexo das cadeias de suprimentos integradas (PIRES ET AL. 2018).

Este trabalho se propôs a explorar as pesquisas mais recentes a respeito da otimização integrada de diferentes etapas da cadeia de suprimentos. Neste trabalho buscou-se entender quais etapas da cadeia são exploradas com mais ênfase e como as tecnologias da indústria 4.0 se aplicam a elas. Ao final pretende-se entender quais métodos de otimização estão sendo explorados para abordar a otimização integrada das diferentes etapas da cadeia de suprimentos se valendo das tecnologias já citadas e propor um *framework* para utilização.

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo Mourtzis et al. (2013), a indústria de manufatura tem apresentados cenários cada vez mais dinâmicos e complexos, o que aumenta a importância de projetos de cooperação entre companhias, para aumento de competitividade. Frazzon et al. (2018) e Ehm et al. (2015)

afirmam que esta nova abordagem da cadeia de suprimentos tem resultado em redes cada vez mais complexas e em uma maior necessidade de melhorias na produtividade e capacidade de resposta. Segundo Mula et al. (2010), companhias de manufatura cada vez mais precisam integrar o planejamento de produção e o transporte com objetivo de otimizar os processos simultaneamente. Frazzon et al. (2013) afirma que decisões sobre produção e transporte, normalmente, são feitas localmente e o resultado obtido pode não ser baseado nos requisitos do sistema como um todo e que decisões não deveriam ser baseadas apenas na eficiência de processos individuais em locais diferentes, mas, preferencialmente, deveriam ser feitas baseando-se no sistema interligado como um todo.

Hermann et al. (2016) afirma que a última revolução industrial, chamada de indústria 4.0, irá guiar as próximas transformações nos processos de produção. Rajkumar (2012) afirma que sistemas ciber físicos (SCF) integram tecnologias de computação com tecnologias de informação e comunicação assim como com métodos de planejamento e controle inteligentes. Ainda segundo Rajkumar (2012), SCF's combinam os aspectos cibernéticos da computação e comunicação com a dinâmica dos sistemas físicos agindo no mundo real. Frazzon et al. (2013) afirma que SCF's possuem potencial para melhorar eficiência, sustentabilidade e escalabilidade de processos. segundo Kusiak (2017), a manufatura inteligente usa os conceitos de sistemas cyber físicos, internet das coisas (IoT), computação na nuvem, computação orientada a serviços, inteligência artificial e ciência de dados.

Organizações do setor de manufatura estão, com ajuda das tecnologias que impulsionam a quarta revolução industrial, visando adotar o planejamento integrado da cadeia de suprimentos como forma de melhorar sua performance (PIRES *et al.*, 2018). Kusiak (2017) explica que os sistemas de manufatura inteligente são uma forma emergente de integração entre ativos de manufatura, plataformas de computação, tecnologias de comunicação, controle, simulação, modelagem intensiva de dados e engenharia preditiva. Kusiak explica, ainda, como a camada de equipamentos de manufatura é interligada com a camada cibernética através de uma interface; os equipamentos de manufatura têm sua própria inteligência enquanto a camada cibernética possui uma inteligência global do sistema.

Por outro lado, Peidro *et al.* (2009) afirma que a conexão entre tantas organizações leva a cenários de incertezas provenientes de três origens: demanda, processamento e suprimento. De acordo com Pirard et al. (2011) para se utilizar modelos matemáticos para

resolver esse tipo de problema em tempo factível, muitas simplificações são necessárias, vários fatores relevantes devem ser deixados de lado.

De acordo com Pirard et al. (2011), simulação é uma técnica que permite levar em consideração a complexidade e o comportamento dinâmico do sistema estudado, além de considerar as incertezas relacionadas ao ambiente (demanda e lead time, por exemplo). Porém, ainda segundo Pirard et al. (2011), a simulação não garante um design ótimo, mas ajuda a estabelecer e avaliar as consequências das decisões tomadas. Essa desvantagem pode ser balanceada com o uso de outras ferramentas como modelagem matemática. A integração de modelos analíticos e de simulação, também chamado de modelos híbridos, são promissores para obtenção de melhores resultados. Segundo Peidro *et al.* (2009). os modelos híbridos visam combinar as vantagens e evitar as desvantagens de cada ferramenta. Liotta et al. (2016) afirmam que a otimização baseada em simulação possui capacidade para lidar de maneira eficiente com cenários mais realistas levando em consideração a dinamicidade do sistema levando a soluções próximas à ótima em tempo factível. Frazzon et al. (2018) propõem otimização baseada em simulação para lidar com sistemas complexos, em um modelo onde a otimização baseada em simulação (OBS) é alimentada com dados em tempo real gerando cenários e realizando estratégias de otimização locais, provendo feedbacks para aperfeiçoar a simulação.

Na literatura consultada não se encontrou uma proposta de framework para otimização baseada em simulação no contexto das novas tecnologias da indústria 4.0. Este fato somado as vantagens já comentadas são a motivação para o trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Propor um framework para o planejamento integrado de cadeias de suprimentos levando em consideração os avanços proporcionados pela indústria 4.0.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Analisar o impacto dos avanços proporcionados pela indústria 4.0 no planejamento integrado de cadeias de suprimentos.
2. Identificar quais são os principais problemas abordados pelos autores que exploram a integração de cadeias de suprimentos,
3. Identificar os métodos de otimização utilizados para lidar com a integração de cadeias de suprimentos.

1.3 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimitou-se apenas a proposição e apresentação do framework, não abordando possíveis testes e avaliações.

1.4 ESTRUTURA

O trabalho está organizado da seguinte maneira: primeiramente é apresentado o referencial teórico para apresentar os conceitos e conhecimento consolidado em relação ao tema do trabalho; em seguida é caracterizada a abordagem do estudo que consiste na metodologia; na etapa seguinte é apresentado o procedimento para seleção de artigos que serão analisados na revisão de literatura; os artigos serão analisados e discutidos em relação aos problemas abordados e propostas de soluções para os mesmos; por fim será apresentado um framework para planejamento integrado de cadeias de suprimentos que busca abordar os problemas observados na revisão de literatura de maneira eficiente e combinar os métodos de resolução propostos nos artigos analisados e apresentados referencial teórico de maneira a aproveitar as vantagens e evitar as desvantagens de cada uma.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção busca elucidar o leitor quanto aos conceitos mais básicos para a compreensão do trabalho proposto. Os conceitos abordados serão a respeito de indústria 4.0; planejamento e controle da cadeia de suprimentos e finalmente o método de otimização baseada

em simulação. Estes serão os pilares básicos para entendimento do trabalho como um todo e como estas partes se relacionam.

2.1 INDÚSTRIA 4.0

Indústria 4.0 é como comumente refere-se à chamada quarta revolução industrial. Drath; Horch (2014) explicam que as 3 primeiras revoluções industriais levaram em torno de dois séculos, a primeira foi resultado da utilização de sistemas de manufatura com máquinas movidas a vapor d'água, a segunda foi consequência de tecnologias de produção em massa com máquinas elétricas e a terceira foi resultado da utilização de tecnologias de informação para maior automatização dos sistemas de produção.

Hofmann; Rüsç (2017) afirma que o conceito de indústria 4.0 ainda não é bem definido e não é completamente estabelecido na prática. O autor apresenta sua definição como sendo:

- Produtos e serviços conectados de maneira flexível através da internet ou outros tipos de rede
- A conexão digital que permite a produção de bens e serviços de maneira automatizada e auto otimizada.
- A cadeia de valor controlada de maneira descentralizada enquanto elementos do sistema tomam decisões de maneira autônoma.

Frazzon et al. (2019) afirma que a indústria 4.0 é um programa estruturado através da cooperação entre pesquisadores da área acadêmica e representantes políticos e da indústria. Thoben et al. (2017) complementa afirmando que a indústria 4.0 é definida pelo uso de *internet of things* (internet das coisas) e *internet of services*, permitindo o surgimento de fábricas inteligentes com sistemas de produção horizontalmente e verticalmente integrados. Liao et al. (2017) adiciona a essa definição a integração digital de ponta a ponta, afirmando que essa é uma das características essenciais da indústria 4.0.

Wang et al. (2016) explica que na era da indústria 4.0 sistemas de manufatura são capazes de monitorar processos físicos, criar “*digital twins*”, ou gêmeos digitais em tradução

livre, do mundo real e tomar decisões inteligentes através de comunicação em tempo real e cooperação com humanos, máquinas, sensores, etc. Zhong et al. (2017), complementa afirmando que a indústria 4.0 combina tecnologias de sistemas de produção com processos de produção inteligentes levando sistemas de manufatura a um nível inteligente. Neste contexto Shen; Norrie (2001) afirmam que manufatura inteligente utiliza informação avançada e tecnologias de manufatura para desenvolver sistemas de manufatura reconfiguráveis, flexíveis e inteligentes capazes de lidar com o dinâmico mercado globalizado. Segundo Wan et al. (2017), sistemas de manufatura inteligentes permitirão que todos os processos físicos e fluxo de informações estejam disponíveis onde e quando forem necessários ao longo de cadeias de suprimentos holísticas. Zhong et al. (2017) afirma que em sistemas de manufatura inteligentes problemas poderão ser resolvidos em tempo real com ajuda de tecnologias que permitam comunicação em tempo real, permitindo também que soluções adaptativas sejam tomadas em tempo hábil.

Para melhor compreensão do conceito de indústria 4.0, é importante conceituar e identificar os principais termos e componentes da mesma. Hermann et al. (2015) identificou quatro componentes chave da indústria 4.0, sistemas cyber-físicos, internet das coisas, internet dos serviços e manufatura inteligente. Estes componentes serão conceituados a seguir para melhor compreensão do leitor.

2.1.1 Sistemas Ciber-Físicos (SCF)

Segundo Rajkumar (2012), o termo indústria 4.0 é frequentemente entendida como a aplicação do conceito genérico de sistemas ciber-físicos, ou *cyber-physical systems (CPS)*, nos sistemas de produção industriais. Drath; Horch (2014) ainda afirma que a quarta revolução industrial é resultado, principalmente, da aplicação de tecnologias da internet na indústria e está fortemente ligada ao conceito de sistemas ciber físicos.

Sistemas ciber físicos são definidos por Rajkumar (2012) como sendo sistemas físicos e construídos cujas operações são monitoradas, coordenadas, controladas e integradas por um núcleo de comunicação computacional. Kusiak (2017), explica que o SCF é originado da integração entre os recursos físicos de manufatura com o espaço cibernético. Segundo Lee et al. (2015), em geral um SCF consiste de dois componentes funcionais principais: (1) a

conectividade avançada que permite a obtenção de dados em tempo real do mundo físico e o feedback de informação do espaço cibernético; e (2) gerenciamento de dados inteligente, capacidades analíticas e computacionais que estruturam o espaço cibernético. Frazzon et al. (2013) afirma que SCF's integram tecnologias de computação com tecnologias de informação e comunicação além de métodos inteligentes de planejamento e controle. Rajkumar (2012) complementa, afirmando que SCF's combinam os aspectos cibernéticos da computação e comunicação com os aspectos físicos e dinâmicos dos sistemas físicos operando no mundo real.

Lee et al. (2013) afirma que através da integração entre SCF, produção, logística e serviços nas práticas industriais atuais, seria feita a transformação das fábricas atuais em fábricas da indústria 4.0 com potencial econômico significativo.

2.1.2 Internet das coisas:

Hermann et al. (2015) define internet das coisas como sendo um mundo em que todas os objetos físicos são interconectados e transformados em “objetos inteligentes” através de pequenos computadores ligados a internet. O autor afirma que a internet das coisas pode ser entendida como uma rede de sistemas ciber físicos que cooperam uns com os outros para atingir objetivos em comum. A aplicação mais relevante para o tema são as fábricas inteligentes ou manufatura inteligente.

2.1.3 Internet dos serviços:

Buxmann et al. (2013) afirma que a internet de serviços consiste em infraestrutura para serviços, participantes, modelo de negócios e os serviços propriamente ditos. Os serviços estão facilmente disponíveis através da rede permitindo que companhias e usuários privados atuem em conjunto para oferecer uma nova forma de valor agregado aos serviços.

2.1.4 Fábricas Inteligentes

Kusiak (2017) correlaciona o conceito de SCF com *smart manufacturing*, que surge da combinação de sistemas ciber-físicos, internet das coisas, computação na nuvem, inteligência

artificial e ciência de dados. *Smart manufacturing*, segundo Kusiak (1990), refere-se a um conceito abrangente de manufatura com propósito de otimizar a produção utilizando-se de informação avançada e tecnologia de manufatura. Zhong et al. (2017) complementa afirmando que o conceito é considerado como um novo modelo de manufatura baseado em *intelligent Science*. Li et al. (2017), afirma que com a ajuda das tecnologias já citadas anteriormente, todo o ciclo de vida do produto pode ser facilitado. Segundo Davis et al. (2012), a eficiência da produção, a qualidade do produto e o nível de serviço podem ser melhorados dentro do sistema de manufatura inteligente. Zhong et al. (2017), complementa afirmando que a competitividade de empresas de manufatura pode ser elevada com a habilidade de lidar com a dinâmica do mercado global através do sistema de manufatura inteligente (SMI).

Na era da indústria 4.0, segundo Feeney et al. (2015), SMI's terão arquitetura orientada ao serviço através da internet para oferecer serviços de maneira customizável, colaborativa, flexível e reconfigurável permitindo o desenvolvimento de uma integração avançada entre humanos e máquinas no sistema de manufatura. Ao passo que Zhong et al. (2017) afirma que através da integração avançada entre máquina e humanos, pretende-se criar um ecossistema entre os diversos elementos envolvidos em um SMI para que os níveis organizacionais, gerenciais e técnicos possam ser perfeitamente combinados. Zhong et al. (2017), resume os elementos do sistema de manufatura inteligente em um framework genérico que também são tópicos de pesquisas futuras dentro da área. Os elementos são:

- 1. Design Inteligente:** com o rápido desenvolvimento da realidade aumenta e realidade virtual, softwares de design são capazes de interagir com sistemas de prototipação físicos inteligentes em tempo real com ajuda de impressoras 3D e sistemas ciber físicos.
- 2. Máquinas Inteligentes:** o autor explica que na indústria 4.0, máquinas inteligentes serão desenvolvidas com a ajuda de robôs inteligentes e outros tipos de objetos inteligentes que serão capazes de detectar e interagir uns com os outros em tempo real através de CPS's.
- 3. Monitoramento Inteligente:** monitoramento é um aspecto importante para as operações, manutenção e otimização da programação de produção na indústria 4.0. Aqui o autor explica que o uso abrangente de sensores torna possível o alcance de monitoramento inteligente. Como exemplo pode-se citar o

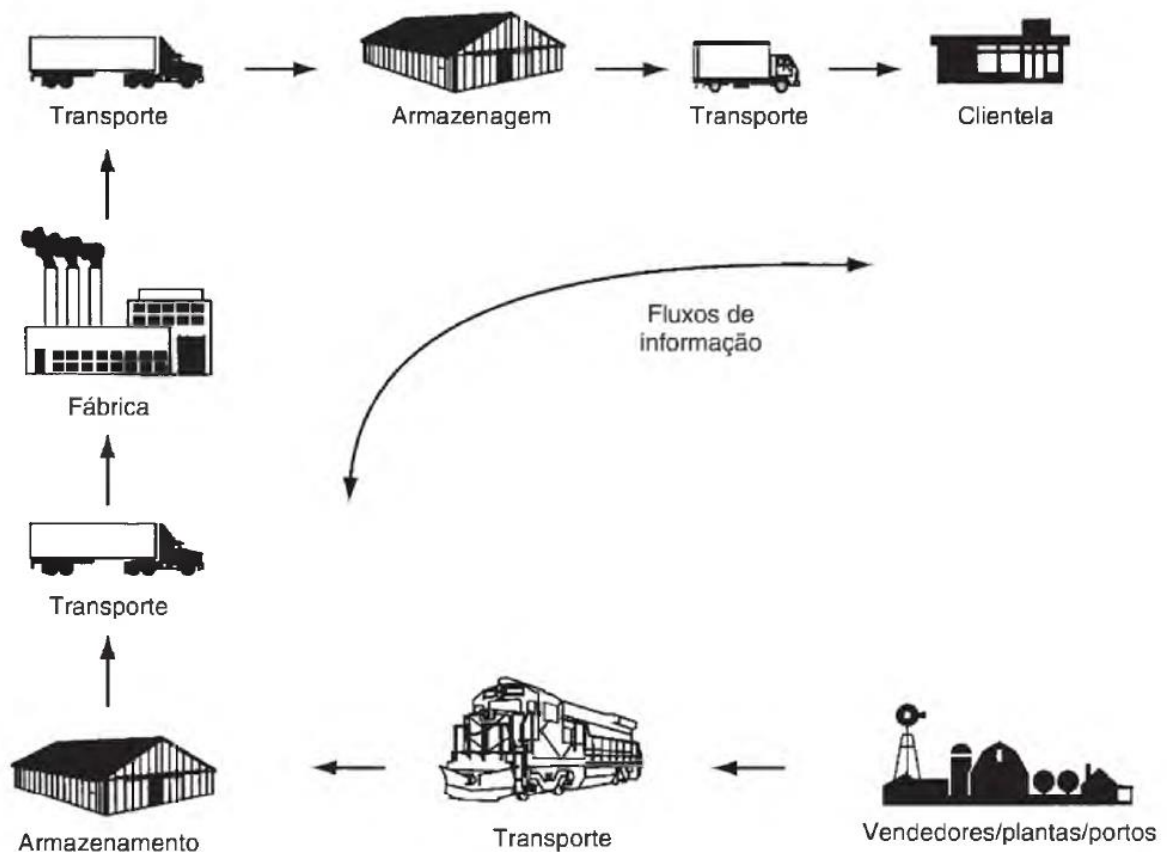
monitoramento em tempo real de dados e informações sobre vários fatores do sistema de manufatura como consumo de eletricidade, temperatura, vibrações e velocidade.

4. **Controle Inteligente:** na indústria 4.0, controle de produção adaptativo pode ser alcançado através do desenvolvimento de sistemas de controle ciber físicos. Controle inteligente é executado principalmente com o objetivo de gerir diversas máquinas inteligentes ou ferramentas inteligentes através de uma plataforma em nuvem. Usuários são capazes de desligar máquinas ou robôs através de smartphones.
5. **Programação Inteligente:** Esse elemento abrange principalmente modelos avançados e algoritmos que usam os dados capturados pelos sensores. Técnicas orientada a dados e arquiteturas de decisões avançadas podem ser usadas neste elemento.

2.2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Primeiramente é importante entender o conceito de cadeia de suprimentos e a abrangência do termo. Segundo Chopra e Meindl (2011) a cadeia de suprimentos pode ser entendida como todas as partes envolvidas direta ou indiretamente no atendimento de um pedido por parte de um cliente. Isso significa que o termo abrange desde o fornecedor de matéria prima até o consumidor final passando pelo setor de transformação e varejo, além de todo o transporte entre essas partes.

Figura 1: Cadeia de Suprimentos



Fonte: Ballou (2006, pag. 30)

Christopher (2011) define gestão da cadeia de suprimentos como a gestão de relações a montante e a jusante com fornecedores e clientes com objetivo de fornecer ao cliente valor superior ao menor custo para toda a cadeia de suprimentos. Em outras palavras o foco está em alcançar o resultado mais lucrativo para toda a cadeia. Bowersox et al. (2002) complementa afirmando que o gerenciamento da cadeia de suprimento envolve a colaboração entre empresas para alcançar posições estratégicas e para aprimorar a eficiência operacional. Ballou (2006) é mais específico afirmando que o gerenciamento da cadeia de suprimentos trata da coordenação do fluxo de produtos ao longo de funções e empresas para produzir vantagem competitiva e lucratividade para cada companhia na cadeia de suprimentos.

Ballou (2006) explica que é muito difícil separar a gestão da logística do gerenciamento da cadeia de suprimentos, e ainda que a primeira capta a essência da logística

integrada. O autor afirma ainda que muitas vezes o termo gerenciamento da cadeia de suprimentos é usado por autores como sinônimo de gestão integrada da logística.

Bowersox et al. (2002), explica que logística é o processo de movimentação e posicionamento de material ao longo de uma cadeia de suprimentos, dessa maneira logística é um processo que ocorre dentro da cadeia de suprimentos. Bowersox et al. (2002) afirma que a logística integrada serve para vincular e sincronizar a cadeia de suprimentos como um processo contínuo e é essencial para a conectividade da cadeia de suprimentos como um todo. Christopher (2007) destaca que a gestão dessa cadeia com todos os elementos citados é uma importante fonte de competitividade.

O conceito de controle da produção é definido como o processo em que o desempenho planejado é alinhado, ou mantido em linha, com os objetivos pretendidos. O processo de controle busca comparar o desempenho real com o desempenho planejado para colocar em prática ações corretivas necessárias, quando necessárias para aproximá-las do planejamento (BALLOU, 2006). Christopher (2007) afirma que para atingir os objetivos planejados são necessários sistemas de medidas efetivos para monitorar, controlar e direcionar as operações logísticas. Portanto podemos concluir que o controle é essencial para que se atinja o que foi planejado.

Para o bom entendimento do estudo é importante também entender quais atividades envolvem o escopo da logística e gestão da cadeia de suprimentos. Ballou (2006) divide as atividades da logística em “atividades-chave” e “atividade de suporte”.

Atividades-chave:

1. Serviços padronizado ao cliente e Marketing:
 - a. Determinar as necessidades e desejos dos clientes em serviços logísticos
 - b. b. Determinar a reação dos clientes ao serviço
 - c. Estabelecer níveis de serviço aos clientes.
1. Transporte:
 - a. Seleção modal e serviço de transporte
 - b. Consolidação de fretes
 - c. Determinação de roteiros
 - d. Programação de veículos
 - e. Seleção do equipamento

- f. Processamento das reclamações
 - g. Auditoria de fretes.
2. Gerencia de Estoques:
 - a. Políticas de estocagem de matérias primas e produtos acabados
 - b. Previsão de vendas a curto prazo
 - c. Variedades de produtos nos pontos de estocagem
 - d. Número, tamanho e localização dos pontos de estocagem
 - e. Estratégias *just-in-time*, de empurrar e de puxar
 3. Fluxos de informação e processamento de pedidos
 - a. Procedimentos de interface entre pedidos de compra e estoques
 - b. Métodos de transmissão de informação sobre pedidos
 - c. Regras sobre pedidos

Atividades-suporte:

1. Armazenagem:
 - a. Determinação do espaço
 - b. Layout do estoque e desenho das docas
 - c. Configuração do armazém
 - d. Localização do estoque
2. Manuseio dos materiais:
 - a. Seleção do equipamento
 - b. Normas de substituição de equipamento
 - c. Procedimentos de separação de pedidos
 - d. Alocação e recuperação de materiais
3. Compras
 - a. Seleção da fonte de suprimentos
 - b. O momento da compra
 - c. Quantidade das compras
4. Embalagem protetora projetada para:
 - a. Manuseio
 - b. Estocagem
 - c. Proteção contra perdas e danos

5. Cooperação com produção/operação para:
 - a. Especificação de quantidades agregadas
 - b. Sequência e prazo do volume da produção
 - c. Programação de suprimentos para produção/operações.
6. Manutenção de informações:
 - a. Coleta, armazenamento e manipulação de informações
 - b. Análise de dados
 - c. Procedimentos de controle.

As atividades-chave estão no circuito crítico do canal de distribuição física imediato de uma empresa e são normalmente representam a maior parte dos custos ou são essenciais para a coordenação e conclusão da missão da logística (BALLOU, 2006). De acordo com o autor as atividades de transporte e manutenção de estoques são as atividades primárias na absorção de custos, representando entre metade e dois terços dos custos logísticos totais.

2.2.1 Planejamento da Cadeia de Suprimentos

Dreyer et al. (2008) explica que o objetivo do planejamento e controle da cadeia de suprimentos é decidir o que e quanto produzir e entregar onde e quando; e como produtos e informações fluem através da cadeia de suprimentos. Também de acordo com o autor, dentro desse processo estão envolvidas várias atividades como: planejamento de compras, gerenciamento de vendas e operações, gerenciamento de demanda e suprimentos, gerenciamento e monitoramento de performance, juntamente com atividade mais operacionais ligadas a planejamento de capacidade e materiais.

Ballou (2006) divide o planejamento logístico da cadeia de suprimentos em três níveis: estratégico, tático e operacional.

- **Estratégico:** é considerado de longo prazo com horizonte temporal de mais de um ano. Vallandingham et al. (2018) exemplifica esse nível como sendo a fase de projetar as configurações gerais da cadeia, sendo necessários investimentos à longo prazo em infraestrutura como: logística de compras, design de armazém e planejamento de distribuição.

- Tático: tem horizonte de planejamento intermediário normalmente inferior a um ano. Segundo, Vallandingham et al. (2018) nessa fase usa o projeto de configuração feito no planejamento estratégico e lida com a coordenação e planejamento de unidades operacionais agregadas com um horizonte de planejamento de 6 a 12 meses.
- Operacional: é o processo decisório de curto prazo, com decisões normalmente tomadas a cada hora ou diariamente. O foco é como encaminhar o produto de maneira efetiva através do canal logístico estrategicamente planejado.

Exemplos de decisões nos três diferentes níveis podem ser vistas na tabela a seguir:

Tabela 1: Processos de Decisões

Área da decisão	Nível da decisão		
	Estratégica	Tática	Operacional
Localização das instalações	Quantidade, área e localização de armazéns, plantas e terminais		
Estoques	Localização de estoques e normas de controle	Níveis dos estoques de segurança	Quantidades e momento de reposição
Transporte	Seleção de modal	Leasing de equipamento periódico	Roteamento, despacho
Processamento de pedidos	Projeto do sistema de entrada, transmissão de pedidos e processamento		Processamento de pedidos, atendimento de pedidos pendentes
Serviço aos clientes	Padrões de procedimentos	Regras de priorização dos pedidos de clientes	Preparação das remessas
Armazenagem	Seleção do material de deslocamento, leiaute da instalação	Escolhas de espaços sazonais e utilização de espaços privados	Separação de pedidos e reposição de estoques
Compra	Desenvolvimento de relações fornecedor-comprador	Contratação, seleção de fornecedores, compras antecipadas	Liberação de pedidos e apressar compras

Fonte: Ballou (2006)

Segundo Ballou (2006) o planejamento logístico busca resolver quatro principais problemas: níveis de serviço aos clientes, localização das instalações, decisões sobre estoques e decisões sobre transportes:

- **Metas de serviço ao cliente:** a principal meta em ter um planejamento logístico é definir níveis apropriados de serviços aos clientes. Quanto maior forem os níveis de serviço,

maiores se tornam os custos logísticos, crescendo de maneira desproporcional em relação ao nível de serviço.

- **Estratégia de localização das instalações:** a localização geográfica dos pontos de estoque e de seus centros de abastecimento cria o esboço do plano logístico. Pela determinação do número, localizações e tamanho dessas instalações e pela atribuição de uma fatia de demanda que se estabelecem os caminhos pelos quais os produtos são direcionados ao mercado. O escopo adequado da questão da localização das instalações de dará ao abranger os custos de toda a movimentação de produtos a partir da fábrica, vendedores ou locais intermediários de estoque até sua entrega ao cliente. O objetivo é encontrar a alocação e custos mínima ou a alternativa de maior lucratividade.
- **Decisões de Estoques:** refere-se à maneira de se gerenciar os estoques. Alocar estoques aos pontos de armazenagem ou puxá-los para os pontos de estocagem de acordo com regras de reposição são estratégias diferenciadas. A estratégia usada pela empresa acabará influenciando na localização da instalação e, por isso, deve ser considerada na estratégia logística.
- **Estratégia de Transporte:** envolvem seleção dos modais, o volume de cada embarque, as rotas e a programação. São decisões sobre as quais pesam fatores como a distância entre armazéns, os clientes e as fábricas. Estes mesmos fatores tem influência sobre a decisão de localização do armazém. Os níveis de estoque também dependem das decisões sobre transportes que variam de acordo com o volume de cada remessa.

Hubner et al. (2013) estruturou um framework para o varejo composto pelas seguintes áreas de decisões: compras, armazenagem, distribuição e vendas. De maneira semelhante, Thomas; Griffin (1996) explica que tradicionalmente existem três estágios na cadeia de suprimentos: compras, produção e distribuição. Podemos perceber então pelo menos quatro grandes áreas ou fases dentro do planejamento da cadeia de suprimentos: compras, produção, armazenagem e distribuição. Dentro de cada um desses estágios da cadeia de suprimentos são desenvolvidas várias atividades. Ballou (2006) afirma que o planejamento logístico dentro de cadeias de suprimentos envolve as atividades de movimentação, armazenagem e estocagem de materiais em redes de nós (pontos de armazenagem e venda) bem como os fluxos de informação através dessa rede.

Figura 2: Fases do planejamento e controle da cadeia de suprimentos

	Procurement	Warehousing	Distribution	Sales
Long-term	Strategic supplier selection Decision support using supplier performance data, and market information to select the most appropriate suppliers, enabled by big data analytics and machine learning	Strategic warehouse analysis Big data analytics of previous and current performance of warehouses, product flow and forecasted demand patterns to allocate activities, functions and locations of warehouses.	Distribution structure Big data analytics of costs and demand patterns to optimize the degree of in-house and outsourced distribution services, and corresponding structure.	Retail store planning Big data analytics using customer profiling, aggregated sales data, and forecasts to determine appropriate number, location and types of stores in retail network.
Mid-term	Product allocation ICT integration combined with advanced forecasting using POS data and inventory level information for improved planning of which stores and warehouses should receive which products.	Warehouse management Product flow, layout and storage area planning within the warehouses, with rapid reconfiguration of AGVs and storage systems through CPS.	Delivery planning Optimized and dynamic delivery planning of frequency, amount and routing, with real-time status of deliveries using IoT.	Assortment and promotion planning Dynamically plan assortment using footfall data, inventory levels, POS data, and market data. Promotion planning using customer profiling and individualized promotions.
Short-term	Supplier order management Optimized dispatch of orders based on forecasts and inventory levels, with real-time tracking of shipments from supplier.	Product handling Automated warehouse operations using mobile robots with route optimization within the warehouse. Augmented reality for efficient picking of goods by workers.	Automated outbound and inbound logistics Using RFID and IoT, an automation of the outbound and inbound logistics to ensure high efficiency and accuracy of product handling.	Instore operations RFID, IoT, and vision technology enable automated shelf management for instore personnel.

Fonte: Vallandingham et al. (2018)

Como é mostrado na figura 2, cada atividade em cada área de decisão necessita ser planejada para os três níveis de planejamento (estratégico, tático e operacional) para atender os níveis de serviço definidos de maneira mais lucrativa para todos os elos da cadeia.

De acordo com Dreyer et al. (2008), O gerenciamento da cadeia de suprimentos, ou logística integrada da cadeia de suprimentos, levou a mudanças na filosofia de planejamento, a complexidade aumentou devido a visão holística da cadeia de suprimentos. Ainda, segundo o autor, o acesso à informação atualizada em tempo real é de vital importância para controle e planejamento competitivo da cadeia de suprimentos. É evidente o papel das tecnologias da indústria 4.0 nesse contexto. A coleta e compartilhamento de dados em tempo real será fator determinante para a otimização dos processos da cadeia de suprimentos tornando-as cada vez mais competitivas e gerando economia para o consumidor final.

2.2.2 Controle da Cadeia de Suprimentos

Segundo Ballou (2006), a elaboração e implementação do planejamento da cadeia de suprimentos não garante a concretização dos objetivos pretendidos. Novaes (2007), afirma que todo o sistema logístico necessita ser constantemente avaliado, monitorado e controlado devido

à complexidade e dinâmica dos problemas logísticos. Christopher (2007) complementa afirmando que o alto nível de competitividade levou a uma ênfase maior no monitoramento de performance não apenas em termos absolutos, mas também em termos relativos aos competidores no mercado e à melhores práticas.

Ballou (2006) explica que devido às incertezas futuras e de mudanças fundamentais no ambiente da cadeia de suprimentos, o profissional de logística deve se municiar de um mecanismo de controle para garantir concretização de metas. É através do controle que o desempenho planejado é alinhado, ou mantido em linha, com os objetivos pretendidos. O processo de controle busca comparar o desempenho real com o desempenho planejado para colocar em prática ações corretivas necessárias, quando necessárias, para aproximá-las do planejamento (BALLOU, 2006).

Bowersox (2002) afirma que para atingir os objetivos de sistemas de monitorar, controlar e direcionar as operações logísticas, é necessário a elaboração de sistemas de medidas efetivos. Christopher (2007) complementa afirmando que as métricas tradicionais devem ser comparadas à outras métricas relevantes ou a um benchmark.

Christopher (2007) afirma que existem três pontos chave no benchmark competitivo, primeiro: a percepção que o cliente tem de performance é a medida mais importante e primordial; segundo: não é suficiente comparar-se ao competidor mais próximo, deve-se comparar ao melhor no mercado; e terceiro: não apenas os outputs devem ser medidos, mas também os processos que produzem o output. Em consonância com o autor, Ballou (2006) afirma que o gerente de logística busca controlar atividades de planejamento logístico em termos de serviço ao cliente e custos da atividade.

Bowersox (2002) afirma que em geral as métricas de performance logística podem ser classificadas nas seguintes categorias: custo, atendimento ao cliente, qualidade, produtividade e gestão de ativos.

- 1. Custo:** o reflexo mais direto da performance logística é o custo incorrido para realizar uma operação específica. É normalmente representada pela quantia total gasta em cada função. É comum monitorar custos de funções logísticas específicas como armazenagem, transporte, e processamento de pedidos. Processamento de pedidos pode ser divididas em atividades específicas, como separação de pedidos no armazém e carregamento dos pedidos, e seus custos relatados individualmente. Também é comum

monitorar dados de custos em termos percentuais em relação a vendas ou como um custo por unidade de volume.

2. **Atendimento ao cliente:** o autor identifica os elementos básicos do atendimento ao cliente como sendo disponibilidade, performance operacional e confiabilidade do serviço. Disponibilidade é reflexo da taxa de atendimento ao cliente. A performance operacional é tipicamente representada pelo tempo médio de ciclo de um pedido, a consistência do tempo de ciclo de pedidos e entregas no prazo.
3. **Qualidade:** performance relativa à confiabilidade no serviço é geralmente refletida na medida de qualidade logística de uma organização. Boa parte das métricas de qualidade são elaboradas para monitorar a efetividades individuais enquanto outras tem como objetivo monitorar a função logísticas em geral. Precisão na performance do trabalho em atividades como entrada de pedidos, separação de pedidos no armazém e preparação de documentos é tipicamente monitorada pela razão entre a quantidade de vezes em que uma atividade foi realizada de maneira correta em relação ao total de vezes que a atividade foi realizada. Outras métricas geralmente utilizadas para medir a performance da qualidade tem relação com a frequência de danos e com precisão da informação disponível.
4. **Produtividade:** é geralmente uma razão ou índice entre os outputs (trabalho completado e serviços produzidos) e a quantidade de recursos utilizados para produzir o output. A produtividade do trabalho no armazém pode ser medida através da razão entre unidades recebidas, separadas e/ou armazenada por colaborador, unidade monetária ou hora.
5. **Gestão de Ativos:** foca na utilização de investimento de capital em instalações e equipamentos bem como capital de giro investido em estoque. Métricas de gerenciamento de ativos focam em quão bem gerentes de logística utilizam o capital investido em operações. Instalações e equipamentos são frequentemente medidos em termo da capacidade utilizada, ou porcentagem da capacidade total utilizada. Para estoques a métrica de performance mais comum é a taxa de rotatividade de estoque, que é geralmente expressa como a razão entre o custo de bens vendidos em um período e custo médio de estoque avaliado no período.

Para concluir, Ballou (2006) afirma que o controle logístico é essencial para garantir que os objetivos em torno dos quais se desenvolveram os planos logísticos sejam atingidos uma vez que a dinâmica e as incertezas do ambiente logístico com o tempo podem provocar desvios no desempenho programado.

2.3 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO

De acordo com Frazzon et al. (2018) métodos analíticos como programação linear tem objetivo de fornecer uma solução ótima, mas em geral podem ser aplicados apenas considerando-se simplificações. Por outro lado, o autor afirma que métodos de simulação permitem considerar o comportamento de sistemas como a dinâmica do ambiente e perturbações, porém o resultado é apenas descritivo. Neste contexto modelos híbridos de otimização e simulação tem como objetivo combinar as vantagens dos dois métodos e evitar as desvantagens da otimização e da simulação. Jung et al. (2004) usou otimização baseada em simulação para incorporação de estoques de segurança e lidar com incertezas sobre a demanda. Schwartz et al. (2006) propôs um modelo um framework de otimização baseada em simulação para controle de inventário em cadeias de suprimentos sob condições de incerteza quanto a oferta e demanda. Freitag; Hildebrandt (2016) desenvolveu uma abordagem de otimização com múltiplos objetivos baseada em simulação para desenvolver regras de despacho para cenários complexos na indústria de semicondutores. Kuck et al. (2016) desenvolveu uma abordagem e otimização baseada em simulação com informações fornecidas em tempo real através de sistemas ciber físicos para selecionar regras de despacho adequadas na programação de um *job shop*, usando estado atual do sistema de produção. Isso demonstra o potencial que o método possui para melhorar o planejamento da produção e de cadeias de suprimentos.

Frazzon et al. (2018), utiliza uma metodologia híbrida de otimização e simulação para melhorar o desempenho em um *job shop*. O autor utilizou a simulação para atuar como função objetivo do algoritmo de otimização. Além disso nesse trabalho o autor considerou que a troca de dados em tempo real entre simulação e sistema real para que a simulação representasse de maneira próxima a situação real do sistema, assim gerando as melhores

soluções para aquele dado momento do sistema real. Para isso o autor considera a utilização de sensores e outras tecnologias da indústria 4.0 para construir um framework que permita a troca de dados em tempo real.

Kuck et al. (2018), também observam que a melhor maneira de se atingir bons resultados sem simplificações exageradas do mundo real é a utilização de simulação em conjunto com otimização para determinar o melhor o conjunto de regras de despacho para máquinas que compõem um *job shop*.

Jung et al. (2004), explica que, apesar de extensa, a literatura que aborda métodos de estimativas para estoques de segurança falha em abordar os problemas mais importantes presentes em cadeias de suprimentos reais. Esses problemas, segundo o autor, seriam a não consideração de distribuições de probabilidade da demanda, a razão entre demanda e capacidade de produção e até mesmo a satisfação do cliente com o mix de produtos produzidos em determinada fábrica. O autor afirma que tais fatores acrescentam complexidade que os modelos tradicionais de inventário não conseguem acomodar. Para contornar esse problema o trabalho desenvolvido pelo autor propõe a utilização de otimização baseada em simulação para determinar estoques de segurança ao longo de cadeias de suprimentos.

Schwartz et al. (2006) explora a utilização de otimização baseada em simulação para gestão de inventário em cadeias de suprimentos. Nesse caso o autor utiliza a simulação para gerar parâmetros que seriam usados nos algoritmos propostos para determinar níveis de estoque de segurança. Ao final da pesquisa se conclui que estoques de segurança podem ser reduzidos significativamente mantendo uma performance operacional satisfatória.

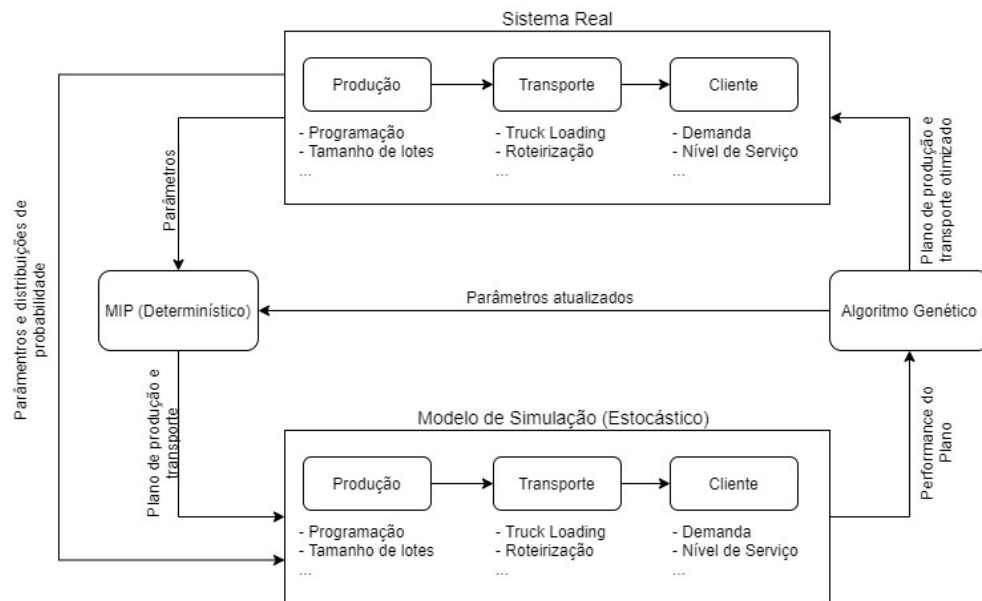
Miranda et al. (2019) desenvolve um modelo de otimização baseada em simulação para apoio sobre decisões relacionadas ao controle de estoque em cadeias de peças de reposição, que é parte importante nas operações de sistemas de manufatura. Em seu trabalho o autor utiliza a metodologia híbrida para avaliar a performance de um sistema de suprimentos de peças de reposição integrado com um sistema de manutenção. O autor considera apenas um processo ou equipamento que sofre falhas relacionadas a três componentes críticos ao longo do tempo. Outra simplificação feita pelo autor é a de que todos os fornecedores possuem estoques suficientes para atender a demanda e o lead time de entrega é fixo. Ao final do trabalho os autores concluem que a metodologia aplicada é eficiente em gerar um melhor equilíbrio entre os custos

do sistema gerando soluções ótimas e uma melhor tomada de decisões. Complementam ainda que a metodologia proposta pode ser utilizada em frameworks mais genéricos.

Como pode ser observado a maioria das pesquisas envolvendo metodologia híbrida focam no gerenciamento de estoques ao longo de cadeias de suprimentos. Porém podemos ver também esforços voltados para a aplicação dessa metodologia para melhorias nos sistemas de produção.

Frazzon et al. (2018) afirma que apesar de existirem esforços voltados para o desenvolvimento de novas abordagens híbridas para o planejamento de produção e distribuição, a literatura ainda está longe de ser completamente explorada. O autor expande a aplicação da metodologia híbrida de otimização e simulação ao aplicá-la no planejamento integrado de processos de produção e distribuição. O artigo ainda propõe uma abordagem que não apenas é capaz de planejar as operações, mas também controla-las, significando que o modelo proposto é capaz de se adaptar de acordo com perturbações no sistema real, melhorando a flexibilidade sistema. O autor argumenta que a metodologia proposta pode tirar vantagem dos SCF para possibilitar a comunicação entre máquinas, dispositivos, sensores ou produtos e assim fazer com que o sistema tenha reação automática a qualquer perturbação inesperada como eventos inesperados – quebra de máquinas ou atrasos nos transportes. A abordagem proposta combina *mixed integer linear programming* (MILP), simulação de eventos discretos e algoritmo genético para atingir os objetivos propostos. A figura 4 apresenta o esquema de funcionamento do modelo proposto pelo autor. Primeiramente o MILP gera um plano ótimo de produção e distribuição, em seguida a simulação avalia a performance do plano considerando comportamento estocástico, o algoritmo genético ajusta os parâmetros do MILP com base nos dados da simulação, o processo se repete até quem que um critério de convergência seja atingido. Segundo o autor a abordagem é capaz de lidar com um número grande de pedidos, cadeias de suprimentos com estruturas complexas e comportamento estocástico. Para completar o autor argumenta que a metodologia proposta pode tirar vantagem dos SCF para possibilitar a comunicação entre máquinas, dispositivos, sensores ou produtos e assim fazer com que o sistema tenha reação automática a qualquer perturbação inesperada como eventos inesperados – quebra de máquinas ou atrasos nos transportes.

Figura 3: Visão geral da abordagem proposta



Fonte: Adaptado de Frazzon et al. (2018)

Pires et al. (2018) segue a mesma linha de raciocínio de combinação entre as duas metodologias para gerar resultados melhores em cenários próximos ao real. O autor expande a aplicação da metodologia para abranger também o suprimento de matérias primas. Nesse caso o autor utiliza um *test bench*, que nada mais é que um modelo de simulação que imita o comportamento do sistema real. Neste trabalho o *test bench* foi utilizado para gerar dados sobre tempos de processamento, custos, distribuições de probabilidades, etc e, com esses dados, alimentar o modelo de simulação do sistema híbrido de otimização e simulação para gerar resultados melhores para o sistema como um todo. O autor também opta apenas pela utilização de algoritmo genético em a combinação com modelos matemáticos.

Frazzon et al. (2018) afirma que a emergência de SCF possibilita o desenvolvimento de métodos integrados de planejamento e controle de cadeias de suprimentos. Pires et al. (2018) afirma que a vantagem da utilização desse tipo de método é não necessidade da utilização de funções matemáticas com simplificações exageradas, que podem apresentar custo computacional elevado e ainda assim não representar a realidade.

A metodologia híbrida possui grande potencial para otimização das partes separadas de cadeias de suprimentos. Porém, segundo os próprios autores que exploram essa metodologia esses cenários podem ser expandidos para se tornarem mais abrangentes com relação aos processos abordados.

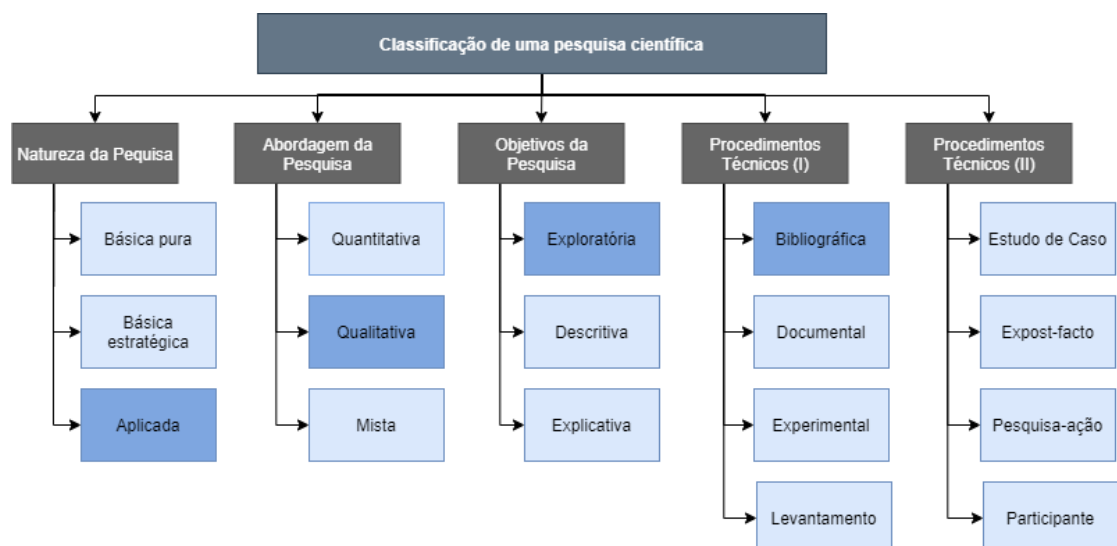
3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as características da pesquisa e os procedimentos metodológicos adotados para sua execução.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

A pesquisa científica é classificada pela sua natureza, sua abordagem, seus objetivos e seus procedimentos técnicos. Este estudo é de natureza básica estratégica, com abordagem qualitativa e objetivo exploratório.

Figura 4: Enquadramento metodológico



Fonte: Autoria Própria

A natureza da pesquisa pode ser classificada como básica pura, básica estratégica ou aplicada (KINCHECKI; ALVES; FERNANDES, 2015). Segundo Silva; Menezes (2005) a pesquisa aplicada tem por objetivo gerar conhecimento para solucionar um problema específico e visa a aplicação prática, envolvendo verdades e interesses locais.

A abordagem da pesquisa pode ser qualitativa, quantitativa ou uma mistura das duas abordagens. A pesquisa qualitativa tem caráter subjetivo, ela não requer o uso de métodos ou técnicas estatísticas, sendo que o ambiente natural é a fonte da coleta de dados e o pesquisador seu elemento chave (SILVA; MENEZES, 2005).

Os objetivos da pesquisa podem ser de cunho exploratório, descritivo ou explicativo. A pesquisa exploratória tem por objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema com o objetivo de torná-lo explícito ou de construir hipóteses e assume normalmente a forma de pesquisas bibliográficas (SILVA; MENEZES, 2005).

Quanto aos procedimentos adotados para realização da pesquisa podemos ter as seguintes classificações: pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental, pesquisa de levantamento, estudo de caso, pesquisa *expost-facto*, pesquisa ação ou pesquisa participante. A pesquisa é classificada como bibliográfica quando o autor se baseia em materiais científicos já publicados (SILVA; MENEZES, 2005).

3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico foi dividido em duas partes. A primeira tem por objetivo coletar e selecionar os artigos mais apropriados e significativos para atender aos objetivos da revisão de literatura. A segunda parte consistiu na análise do conteúdo dos artigos para atingir os objetivos específicos.

Estudos avaliaram a qualidade de relatórios de revisões de literatura e concluíram que os mesmos não atenderam todos os critérios de qualidade, assim, um procedimento sistemático se faz necessário para garantir a reprodutibilidade e clareza do estudo, a fim de identificar seus pontos fracos, fortes e achados (MOHER et al., 2009). Este estudo utiliza uma abordagem composta por diretrizes e procedimentos apresentados por Moher et al. (2009) e Seuring; Gold (2012) para basear a revisão sistemática literatura. Este estudo utiliza o método PRISMA –

Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses (MOHER et al., 2009) – adaptado.

3.3 PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta o procedimento adotado para seleção de artigos para análise bibliográfica.

3.3.1 Coleta de Artigos

O primeiro passo da pesquisa foi juntar a maior quantidade possível de documentos relacionados com o tópico em bases de dados representativas. As bases de dados selecionados cobrem as principais revistas que tratam das áreas de engenharia e cadeia de suprimentos, são eles: Scopus (www.scopus.com), Science Direct (www.sciencedirect.com) e Web of Science (www.webofknowledge.com) (UHLMANN; FRAZZON, 2018).

Para cumprir o objetivo da pesquisa e encontrar os documentos corretos com a combinação correta de palavras-chave, foram executadas duas pesquisas diferentes em cada base de dados. A primeira foi executada com a seguinte string e operadores booleanos: (TITLE("Supply Chain") AND TITLE(integrated) AND TITLE(planning OR control)) AND DOCTYPE(ar OR re). A segunda foi executada com a seguinte string e operadores booleanos: (TITLE(planning OR control) AND TITLE(integrated) AND TITLE("Supplier Selection" OR "Material Inventory" OR "Production" OR "Scheduling" OR "Transportation" OR "Distribution" OR "Routing" OR "Sales and Operations")) AND DOCTYPE(ar OR re).

Planejamento e controle da cadeia de suprimentos tem um alto volume de publicações. No entanto, diversos estudos não utilizam de maneira correta o termo no título ou nos abstracts. Estes documentos continuam sendo importantes para a análise e, por essa razão, diversas palavras-chave identificando processos ao longo da cadeia de suprimentos foram incluídas. A inclusão dessas palavras-chave resultou numa quantidade enorme de documentos retornados e para ter certeza de que apenas os documentos que fossem intimamente relacionados com o tópico fossem selecionados, apenas a seção Título foi analisada.

3.4 SELEÇÃO DE DOCUMENTOS

A quantidade de documentos coletados no primeiro passo da pesquisa foi naturalmente alta. No entanto, nem todos precisavam ser incluídos no processo de revisão, apenas os mais relacionados e com maior impacto para o tema foram selecionados. Para realizar a seleção foram executados processos de triagem para decidir quais documentos atendiam os critérios. Para esclarecer os critérios de inclusão e exclusão de documentos do processo de revisão foi elaborada uma tabela adaptada de Uhlmann; Frazzon (2018). Os critérios são descritos na tabela 1.

Tabela 2: Critérios de inclusão e exclusão de documentos

Ação	Critério	Explicação do critério	
Inclusão	Intimamente relacionado (IR)	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisa é especificamente e explicitamente dedicada ao planejamento integrado da cadeia de suprimentos • Intervalo de tempo entre 2011 e 2018 • Área da matéria: engenharia • Tipo de documento: artigo ou artigo de revisão • Tipo de fonte: Conference proceedings or Journals • Idioma: Inglês 	
Exclusão	Mecanismo de pesquisa (MP)	Texto não está integralmente em inglês	
	Sem texto completo (ST)	Texto não está integralmente disponível	
	Intervalo de tempo (IT)	Artigo publicado antes de 2011	
	Não Relacionado (NR)	NR1: Paper não é artigo acadêmico	
	Pouco relacionado com o tema (PR)		NR2: O documento não está alinhado com planejamento integrado da cadeia de suprimentos
			O documento não foca na discussão ou resolução do problema de reagendamento da produção
			PR1: Planejamento integrado da cadeia de suprimentos é usado apenas como um exemplo ou contexto PR2: Planejamento integrado é citado apenas como pesquisa futura PR3: Planejamento integrado da cadeia de suprimentos é apenas mencionado PR4: Planejamento integrado da cadeia de suprimentos é apenas usado como palavra chave e/ou referências
Área específica	Documento aborda áreas não relacionadas com produção. Exemplo: logística em desastres.		
Nível de planejamento	Documento não aborda o nível operacional.		

Fonte: Autoria Própria

Antes de se dar início ao processo de triagem, um software foi utilizado para eliminar documentos em duplicidade, visto que é muito provável que o mesmo artigo esteja disponível em base de dados distintas. Então se deu início a primeira parte do processo de triagem, eliminando os documentos publicados anteriormente ao ano de 2011. Esse critério é justificado pelo fato de que o conceito de indústria 4.0 apenas começou a ser disseminado a partir de 2011,

o presente trabalho, então, foca em artigos sobre o planejamento integrado da cadeia de suprimentos após o referido ano.

O segundo processo de triagem teve como critério análise dos títulos para identificar artigos não relacionados ou com pouca relação com o tópico.

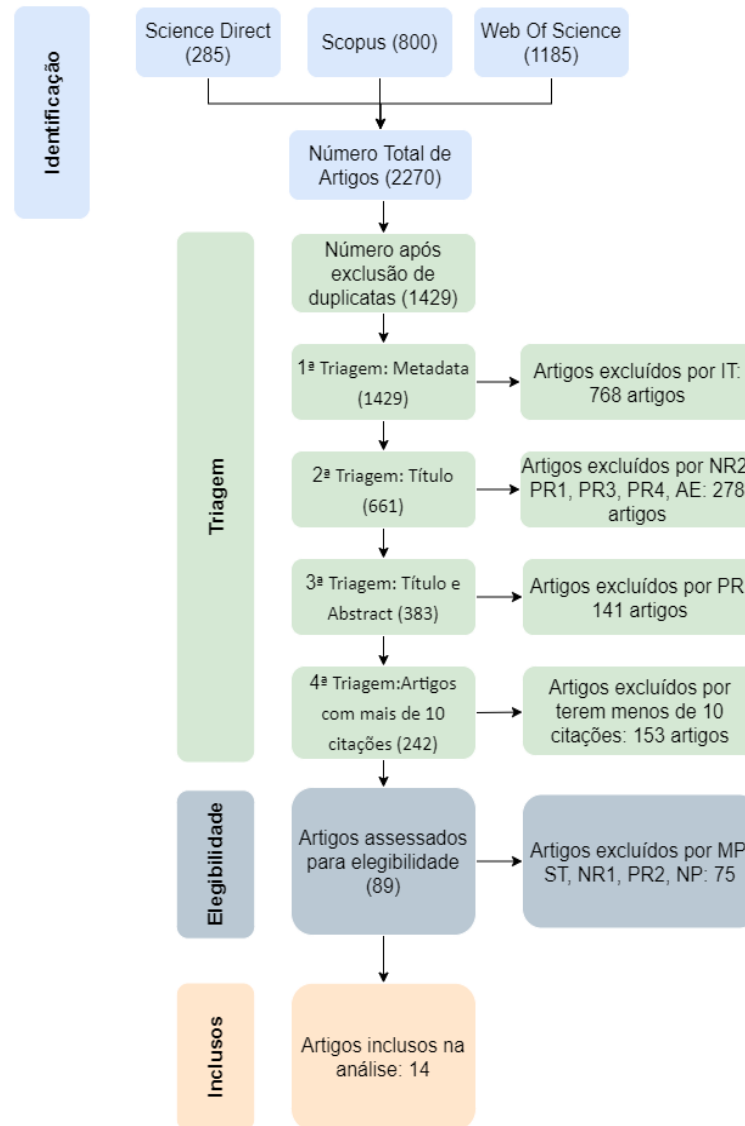
Na terceira triagem foram lidos os abstracts e artigos que abordavam apenas os níveis estratégico e tático foram excluídos.

Na quarta e última triagem, devido ao grande número de artigos restantes, foi analisado o número de citações de cada artigos. Os artigos com 10 ou menos citações foram excluídos, para que o estudo ficasse com os documentos mais relevantes. O número de citações por artigo foi escolhido de acordo com o princípio de Pareto, ou regra 80/20. Por esse critério foram selecionados os artigos responsáveis por exatamente 82,70% do total de citações na base de dados ao início da quarta triagem. É importante ressaltar que artigos publicados no ano corrente foram desconsiderados nesta etapa.

Na etapa de elegibilidade, o texto completo foi analisado e artigos que não possuíam os textos integralmente disponíveis ou que não possuíam o texto integralmente em inglês foram excluídos. Além disso, foram selecionados apenas os artigos que tratavam de modelos de integração que levassem em consideração incertezas, dinamicidade e abordagens eficientes para encontrar soluções para o problema de planejamento integrado de CS's.

Ao final da etapa de elegibilidade, temos o banco de dados final de artigos para serem lidos e analisados. Os detalhes de cada etapa estão descritos na figura 5:

Figura 5: Fluxograma PRISMA



Fonte: Autoria Própria

A partir dos documentos selecionados serão identificados os principais problemas relacionados ao planejamento integrado de cadeias de suprimentos e quais técnicas e abordagens estão sendo utilizadas para atacar esses problemas. A partir dessa análise serão selecionados os elementos do framework para abordagem híbrida de otimização e simulação bem como o melhor procedimento para a integração entre otimização e simulação de maneira a tirar melhor proveito das duas técnicas. Além disso, o framework deve conter os conceitos e tecnologias descritos na seção 2.1 que trata sobre a indústria 4.0.

5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DE CONTEÚDO

Neste capítulo apresentam-se os resultados da análise dos artigos incluídos na pesquisa buscando entender quais são os métodos e procedimentos utilizados para lidar com a otimização integrada de cadeias de suprimentos e se as tecnologias da indústria 4.0 estão sendo abordadas.

Os artigos foram divididos em dois grandes grupos após a análise de seu conteúdo. O primeiro grupo é composto pelos artigos que buscam o desenvolvimento de abordagens que lidem com a complexidade de cadeias de suprimentos de maneira eficiente, isto é: métodos que retornem resultados ótimos ou próximos ao ótimo em tempo factível, com tempo computacional razoável.

O segundo grupo é composto por artigos que buscam lidar com a dinamicidade das cadeias de suprimento. Esse grupo é especialmente importante pois mostra as principais pesquisas que buscam mitigar os efeitos de incertezas nas cadeias de suprimentos.

Ao final da discussão dos artigos selecionados é esperado que tenhamos os elementos que farão parte do framework para uso de metodologia híbrida para otimização de cadeias de suprimentos.

5.1.1 Desenvolvimento de abordagens eficientes

O planejamento e controle integrado da cadeia de suprimentos tem como objetivo obter competitividade abordando uma grande quantidade de variáveis de decisões e por consequência obtendo um ponto ótimo global. No entanto, as variáveis de decisões se estendem por múltiplos horizontes de planejamento exigindo que várias restrições sejam atendidas e levando a um problema de complexidade elevada e que demanda um grande esforço computacional para ser solucionado. Para lidar com tal complexidade diversos autores têm direcionado pesquisas para

o desenvolvimento de abordagens que sejam capazes de lidar com estes problemas de maneira eficiente, ou seja, que retornem ótimo global em tempo factível e com menor demanda computacional.

Segundo Fahimnia et al. (2012) um plano de produção-distribuição integra as decisões de produção, transporte e questões de gerenciamento de estoque. O autor afirma ainda que o desempenho geral de uma cadeia de suprimentos é significativamente influenciado pelas decisões tomadas em seu plano de distribuição de produção e, portanto, uma questão-chave na avaliação de desempenho de uma cadeia de suprimentos é a modelagem e otimização do plano de distribuição de produção, considerando sua complexidade real. Com isso em mente, os autores desenvolvem um modelo de Mixed Integer Non-Linear Formulation (MINLF) para uma cadeia de suprimentos considerando as variáveis e restrições do mundo real. Os autores apresentam um algoritmo genético para a otimização do modelo matemático desenvolvido. Segundo os autores, a utilização de algoritmo genético é apropriada para esse tipo de problema pois é capaz de lidar com um grande número de parâmetros de maneira efetiva, é mais rápido para encontrar ótimos globais em comparação com outras técnicas e gera várias soluções ótimas permitindo a escolha por parte tomador de decisão. A implementação do algoritmo genético desenvolvido gerou reduções de custos significativas dentro de um intervalo de tempo aceitável.

Piewthongngam et al. (2013) desenvolvem um modelo matemático para formulação de um problema de produção e distribuição de ração para fazendas de porcos. Os autores desenvolveram uma heurística baseada no modelo matemático formulado a fim de reduzir tempos computacionais e tornar o uso do modelo viável. O modelo proposto determina os ciclos de entregas, número de caminhões usados e tamanho do lote de produção da fábrica de ração, de modo que o custo da fábrica para a ração seja minimizado. A heurística dos autores obtém desvia levemente do resultado ótimo, porém apresenta tempos computacionais drasticamente menores.

Shah; Ierapetritou (2012) ataca o problema de planejamento e programação da produção em fábricas espalhadas por localidades diversas. Apesar de focar na produção, os autores não ignoram o planejamento de estoques e distribuição. O modelo matemático desenvolvido é um *mixed integer programming* (MIP). Os objetivos do modelo de planejamento e programação integrados são determinar os perfis de produção diária em cada instalação e perfis de remessas para distribuição para cada centro de distribuição de maneira a

satisfazer a demanda minimizando os custos de estoques, de *backorders*, de transportes e de produção. Os autores afirmam que a otimização do problema se torna computacionalmente intratável à medida que o número de locais de produção, mercados e produtos aumentam na cadeia de suprimentos. Para atacar o MIP proposto e alcançar uma solução em tempo razoável os autores utilizam um método de decomposição lagrangiano.

Jolai et al. (2011), desenvolve um modelo de programação linear com múltiplos objetivos para abordar o problema de integração entre produção e distribuição, considerando diversos objetivos conflitantes. O problema é composto por um fabricante com diversas fábricas, produtos, centros de distribuição, varejistas e clientes. Os autores propõem um algoritmo genético simples, um algoritmo do tipo *particle swarm optimization (PSO)* e um algoritmo genético híbrido com melhorias. Todos os métodos são utilizados para resolução do problema em questão concluindo que o algoritmo genético híbrido proposto pelos autores é capaz de retornar soluções com desempenho superior as dos demais métodos em um tempo razoável. Neste caso, o algoritmo genético híbrido utiliza o PSO para gerar a solução inicial, em contrapartida ao algoritmo genético simples que gera soluções iniciais de forma aleatória.

Steinrücke (2011) propõe uma heurística relax-and-fix para lidar com o modelo de planejamento e programação de produção e transportes de uma cadeia de suprimentos de alumínio real. Cenários aleatórios são gerados e apresentados para demonstrar que a heurística é capaz de obter soluções próximas da ótima e em tempos computacionais drasticamente menores.

Liu et al. (2018) abordam um problema de alocação de instalações de manufatura celular em diversas fábricas ao longo de uma cadeia de suprimentos. Os autores tratam do problema de realocação das celular nas fábricas conforme mudança de demanda de lugar para lugar. O objetivo é minimização de custos com salários, custo de transferências de instalações, custos com materiais, custos com *backorder* e custos de estoques. Para solucionar o problema os autores propõem um *integrated bacteria foraging algorithm (IBFA)* e o comparam a um algoritmo genético e a um algoritmo *simulated annealing*. Ao final da pesquisa os autores afirmam que o IFBA retorna resultados melhores para o mesmo tempo de processamento.

Ma et al. (2016) desenvolvem um modelo que integra produção e distribuição visando minimizar o custo global da cadeia. Os autores desenvolvem um algoritmo genético com um controlador lógico difuso, no qual simulação aleatória difusa é utilizada para lidar com

incertezas. O algoritmo genético proposto pelos autores teve performance superior quando comparado algoritmos genéticos mais simples.

Por fim, Su et al. (2015) seguem na linha de integração entre produção e distribuição mas adicionam em seu modelo também decisões de parceiros para aquisição de material. Os autores desenvolvem um algoritmo híbrido que combina *particle swarm optimization* e algoritmo genético com esquema de aprendizado. O algoritmo proposto pelos autores tem desempenho superior ao algoritmo genético convencional e ao algoritmo genético com esquema de aprendizado aplicados isoladamente.

A complexidade e o tamanho dos problemas de integração geram problemas com alto grau de complexidade e, conseqüentemente, muito custosos computacionalmente para serem resolvidos. Isso leva a uma grande necessidade de se desenvolver novos modelos e novos algoritmos para otimização desses modelos de maneira eficiente. Daí, também, a importância na seleção do método para realizar a parte de otimização do OBS.

De acordo com o que foi visto nos artigos selecionados, o algoritmo genético é a escolha mais adequada para solucionar modelos que buscam otimizar, de maneira integrada, múltiplas etapas de cadeias de suprimentos.

5.1.2 Dinamicidade e flexibilidade

Um dos grandes desafios ao se tratar do planejamento integrado de diversas fases da CS simultaneamente é a dinamicidade do sistema. Sendo assim, um dos grandes problemas frequentemente observado nos artigos selecionados é o desenvolvimento de modelos flexíveis capazes de lidar com incertezas dentro das cadeias de suprimentos. Inúmeros autores buscam uma maneira de fazer o planejamento integrado da cadeia de suprimentos de maneira a torná-la mais flexível e adaptável às incertezas.

Hossain; Hossain (2018) formulam um modelo de programação linear *fuzzy* com múltiplos objetivos visando minimizar custos de produção de diversos produtos, em diversos períodos ao mesmo em que minimiza os custos de distribuição para diversos centros de distribuição em uma cadeia de suprimentos sujeita a diversas incertezas. Os autores utilizam método de *minimum operator* para agregar todos os conjuntos *fuzzy* e então desenvolvem um método de média ponderada baseado no método de *analytic hierarchy process* (AHP) para

determinar a importância relativa das funções objetivo. Como resultado os autores obtêm um framework flexível para tomada de decisões sujeitas à uma variedade de incertezas e otimizando os custos integrando fases distintas da cadeia de suprimentos.

Varthanan et al. (2012), desenvolvem uma heurística do tipo *particle swarm optimization* baseada em simulação para abordar o problema de produção e distribuição num cenário com demanda estocástica. Os autores desenvolvem um modelo de planejamento integrando produção e distribuição considerando custos de produção regulares, extra e terceirizados juntamente com custos de manutenção de estoques, pedidos em atraso, contratações/demissões e distribuição. Assume-se que a demanda varia uniformemente. Para resolver o problema, primeiramente os limites de demanda máxima e mínima são determinados para cada cliente e uma demanda aleatória dentro do intervalo é selecionada. Em seguida o PSO é executado diversas vezes considerando a demanda determinística para encontrar a melhor combinação de parâmetros. A população das N melhores soluções obtidas nas interações anteriores é selecionada para a abordagem de otimização baseada em simulação. As simulações são executadas gerando demandas aleatórias seguindo uma distribuição uniforme, status de inventário/*backorder* são determinados e o custo total da solução para cada demanda é calculado. Desta forma, a demanda é gerada diversas vezes e o custo médio total da solução é calculado e utilizado como parâmetro de adequação dessa solução. O algoritmo gera novas soluções iterativamente a partir daí até que a melhor solução aproximada seja obtida após um determinado número de interações.

Das (2018) explora a exposição das cadeias de suprimentos a situações imprevisíveis de desastres que não possuem dados históricos para usar como base para o planejamento. O objetivo do estudo é desenvolver um plano resiliente da cadeia de suprimentos para conter interrupções e riscos nas operações gerais da empresa. O estudo integra considerações de resiliência em um modelo de planejamento de negócios que fórmula performance de resiliência de funções da cadeia de suprimentos em termos de flexibilidade e confiabilidade. O modelo avalia a performance de resiliência dos planejamentos da CS e determina sua vulnerabilidade considerando recursos necessários e planejados. O modelo proposto pelos autores estima os possíveis efeitos de desastres em funções vulneráveis da CS usando análises baseadas em cenários e opções de contenções. Além disso, os autores incluem no modelo opções de decisões

para implantar os recursos para se atingir os níveis desejados de resiliência, impedindo possíveis vulnerabilidades.

Ivanov et al. (2011), abordam o problema de integração entre produção e distribuição. Os autores resumem os principais desafios do planejamento e programação da cadeia de suprimentos como sendo as grandes dimensões e não linearidade dos modelos existentes de gerenciamento da CS, o problema de descrever os fatores de incertezas e o problema da subjetividade na tomada de decisões baseadas em diversos critérios. Esses são os fatores citados pelos autores como sendo motivadores da abordagem desenvolvida por eles em seu trabalho. Os autores afirmam que o foco da pesquisa foi explorar as possibilidades da combinação de diferentes técnicas de tomada de decisões como pesquisa operacional e *control theory* e alcançar tomadas de decisões de melhor qualidade. Os autores distribuem os elementos estáticos e dinâmicos em dois modelos a fim de evitar um problema de dimensão sobrecarregada de um modelo geral e ao mesmo tempo representar as variáveis, restrições e objetivos correspondentes na classe de modelo mais apropriada.

Frazzon et al. (2015) propõe e testa um modelo híbrido para a programação e controle da produção e processos logísticos de cadeias de suprimentos de exportação de maneira integrada. O modelo combina programação linear com simulação discreta. O modelo de simulação leva em consideração uma fábrica, um terminal intermodal, conexões através de ferrovias e estradas e um terminal portuário. O procedimento ocorre basicamente da seguinte maneira: o modelo matemático fornece a programação ótima coordenando e sincronizando o fluxo de ordens e estoques necessário para atender a demanda no nível de serviço desejado; em seguida essa solução ótima é testada no modelo de simulação, levando em consideração os aspectos estocásticos do cenário real, o resultado é o comportamento aproximado do cenário real; por último, um algoritmo de controle avalia a performance e, de acordo com uma lógica predeterminada, permite a implementação do resultado no cenário real ou implementa mudanças no modelo de programação linear integrado.

Também buscando integrar produção e distribuição Liang (2012), propõe um modelo para resolver o problema de tomada de decisões com diversos objetivos imprecisos em uma cadeia de suprimentos sujeita a um ambiente de incertezas. Para solucionar o modelo desenvolvido o artigo apresenta um método de programação linear probabilístico (*possibilistic linear programming*). O método proposto se mostra prático para atacar o modelo de SC com

objetivos imprecisos e em ambientes de incertezas e possibilita uma melhora significativa na relação entre produção e distribuição.

Podemos observar que a utilização de metodologias híbridas para atacar as incertezas presentes no ambiente de CS's integradas ainda é pouco explorado. Muitas contribuições podem ser feitas com relação a estrutura dos procedimentos e com relação à metodologia para abordar e solucionar os modelos propostos.

5.1.3 Impactos da indústria 4.0

A indústria 4.0 é mencionada em apenas um dos artigos selecionados. Frazzon et al. (2015), cita a possibilidade de utilização de sensores para possibilitar a troca de dados entre o sistema real e seu modelo de simulação possibilitando a flexibilidade do modelo proposto em seu trabalho. O autor propôs a utilização dessa tecnologia para manter a representação digital do sistema real atualizada em termos de probabilidade de ocorrência de eventos inesperados. Nesse caso, a tecnologia seria usada para manter o modelo tão próximo do real quanto possível conferindo a propriedade de reagir a eventos inesperados de maneira automática.

Esse tipo de aplicação da tecnologia, confere ao modelo do autor a capacidade de lidar com dinamicidade do mundo real. Ainda assim, esse tipo de aplicação é pouco mencionado na literatura de planejamento integrado de cadeias de suprimentos, como podemos observar.

É razoável concluir que o uso das tecnologias disponíveis com a indústria 4.0 ainda é pouco explorado dentro do contexto de planejamento integrado de cadeias de suprimentos.

5.1.4 Quais as oportunidades de pesquisas futuras apontadas pelos autores?

Uma das principais sugestões de melhorias e possibilidades de pesquisas futuras mencionadas pelos autores é a inclusão da capacidade de lidar com estocástica e dinamicidade em seus modelos. Fahimnia et al. (2012) concluem no final de sua revisão sistemática, entre outras coisas, que o desenvolvimento de modelos dinâmicos, probabilísticos e estocásticos de produção e distribuição foi, na época, explorado por poucos pesquisadores e que a volatilidade e a incerteza dos principais parâmetros de entrada devem ser tratadas em futuros modelos de produção e distribuição.

Por outro lado, uma série de autores aponta para o desenvolvimento de novos métodos para obter melhores soluções para seus modelos. Ma et al. (2016) aponta em seu estudo a necessidade de se considerar um número maior de participantes na cadeia de suprimentos e o teste de novos algoritmos para avaliar sua eficiência na resolução do planejamento integrado de produção e distribuição abordado pelos autores. Fahimnia et al. (2013) afirma que a complexidade dos modelos aumenta muito ao se tentar obter ótimos globais mesmo para cadeias de suprimentos simples e, portanto, defendem o desenvolvimento de técnicas para resolução de modelos mais complexos e realistas.

O outro tema comum de sugestões para pesquisas futuras nos artigos escolhidos foi o aumento da complexidade dos modelos propostos para melhor representar a realidade das empresas. Nesse sentido Fahimnia et al. (2013) sugere o desenvolvimento de modelos que contenham múltiplas fábricas para a simulação do comportamento real das cadeias de suprimentos atuais. Liu et al. (2018) sugere alterações em seu modelo no sentido de permitir que as células de fabricação do modelo sejam capazes de fazer suas próprias aquisições de materiais e realizar vendas para clientes de maneira autônoma e independente, além de sugerir a inclusão de fatores que representem a diferença de produtividade entre diferentes trabalhadores. Frazzon et al. (2015) sugerem testar cenários mais desafiadores mais próximos de aplicações do mundo real, como sistemas de produção de job-shop e redes de transporte, além de incluir fluxo de informações bidirecionais entre processos de produção e transporte e tomada de decisão automatizada, estruturada por meio de uma estrutura de troca de dados.

6. PROPOSTA DE FRAMEWORK PARA PLANEJAMENTO INTEGRADO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS.

Nesse capítulo será apresentada a proposta de framework para uma abordagem que seja capaz de lidar com o planejamento integrado de produção e processos logísticos dentro de cenários com incertezas. Ou seja, o framework abordará produção, inventário de material (matéria prima e produto acabado) e transportes considerando a estocasticidade de uma cadeia de suprimentos genérica com base no que foi visto nos modelos e métodos dos artigos selecionados.

Além disso, o framework deverá considerar a utilização de tecnologias da indústria 4.0 para transferências de dados do mundo real para o sistema de otimização em tempo real, possibilitando que o modelo de simulação esteja sempre atualizado representando o status atual de todos os componentes da cadeia.

6.1 PARÂMETROS E ABRANGÊNCIA

A maior parte dos artigos selecionados focam na integração entre produção e distribuição pois os autores consideram serem as partes com mais críticas e com maiores custos. No entanto, a inclusão do processo de aquisição e gestão de estoques de matérias primas pode proporcionar ganhos ainda mais significativos e permitir maior sincronia dentro da cadeia.

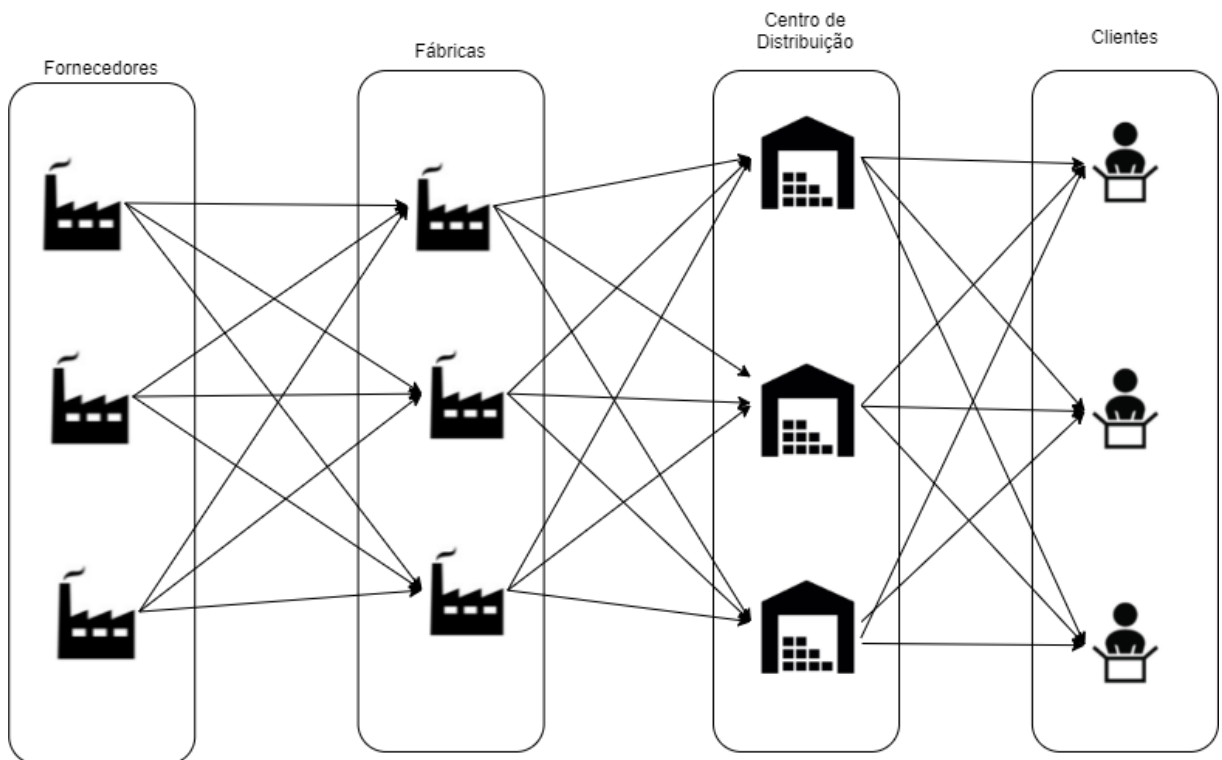
Por outro lado, na seção que tratou dos estudo que abordam otimização baseada em simulação podemos observar que a maioria dos artigos são focados na gestão de estoques e na otimização de processos de produção. Em outras palavras, os artigos, em sua maioria, não consideram a cadeia de suprimentos como um todo. A abordagem proposta por Frazzon et al. (2018) vai para além do planejamento de produção e inclui também variáveis para a decisão em relação a transportes. Pires et al. (2018) por sua vez, propõe um modelo que engloba também fornecedores de matéria prima. Porém, ambos ignoram outros aspectos importantes como planos de manutenção, por exemplo. Outra simplificação dos modelos é em relação ao número de fornecedores, número de fábricas e modais de transporte.

Ma et al. (2016), por outro lado aborda outros tipos de decisões dentro de seu modelo. Nesse caso o modelo define quais fábricas e centros de distribuição devem ser abertos em quais localidades para atender determinados clientes minimizando o custo total das operações. Por outro lado Frazzon et al. (2018), inclui complexidade na decisão de transportes ao considerar mais de um modal e até a combinação entre dois modais, levando a necessidade de considerar períodos para a reorganização das ordens para os clientes na troca entre modais. Hossain; Hossain (2018) adicionam ainda mais complexidade ao considerarem múltiplos objetivos com pesos determinado através *analytical hierarchy process* (AHP), além disso, o autor ainda considera variáveis como: capacidade dos fornecedores de matéria prima, capacidades dos centros de distribuição em determinado período e habilidades dos colaboradores.

Como já foi mencionado anteriormente, Pires et al. (2018) afirma que uma das vantagens da utilização da simulação é a possibilidade de considerar todo o cenário real sem simplificações exageradas de modelos matemáticos. Sendo assim, conclui-se que é possível considerar todos os fatores de complexidade mencionados pelos autores citados sem grandes custos computacionais.

Sendo assim, para considerar toda a complexidade de cadeias de suprimentos reais e se aproveitar de todo o potencial da metodologia de otimização baseada em simulação o framework deve considerar múltiplos fornecedores de matérias primas, diversas fábricas espalhadas geograficamente, centros de distribuição espalhados e os modais de transporte disponíveis. Em relação às restrições, devem ser considerados: produtividade dos colaboradores, capacidades de máquinas, de armazéns, de cada modal de transporte disponível e capacidade de cada fornecedor.

Figura 6: Processos abordados



Fonte: Autoria própria

Dessa forma as variáveis de decisão apresentadas na forma de solução do modelo para cada período devem ser:

- Estoques de segurança de matéria prima e produto acabado para cada unidade de produção e alocados em cada centro de distribuição;
- regras de despacho para cada máquina de cada unidade de produção;
- roteirização de veículos para distribuição de cada fábrica;
- escolha de quais fábricas devem atender quais clientes ou regiões;
- escolha de produtos que devem ser produzidos em cada fábrica;
- escolha de fornecedores para cada fábrica.

Essa solução deverá ser gerada de maneira a minimizar o custo total do sistema ou maximizar outros objetivos como nível de serviço e lucros. Esses objetivos deverão ser calculados a partir dos custos totais com estoques (matéria prima e produto acabado), custos totais com produção (custo relacionado a cada produto em cada processo de produção e custos de set up) e custos totais pela falta do produto para o cliente final (definido como uma penalidade relacionada ao número de períodos entre a data prometida e data efetiva de entrega).

Obviamente existem muitas outras variáveis de decisões dentro de um sistema tão complexo. Este trabalho mencionou as variáveis de decisões observadas nos estudos citados.

6.2 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Como já mencionado anteriormente, Pires et al. (2018) afirma que a representação de problemas dessa complexidade por modelos matemáticos leva a simplificações exageradas e a custos computacionais elevados para sua resolução e ainda assim não representam de maneira satisfatória o mundo real. Por essa razão acredita-se que utilização de simulação para modelar a cadeia de suprimentos com todas as suas variáveis e restrições seja uma opção capaz de retornar melhores resultados.

6.3 ESCOLHA DE ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO

De acordo com a literatura estudada a representação de uma cadeia de suprimentos com múltiplos fornecedores, diversas plantas de produção atendendo um grande número de clientes é um problema com uma quantidade muito grande de variáveis e complexidade elevada. Para abordar modelos matemáticos que representem CS's de maneira próxima à real é necessária a utilização de métodos que sejam capazes de fornecer boas soluções em tempo de processamento apropriado para o uso na prática como visto na seção 5.1.2.

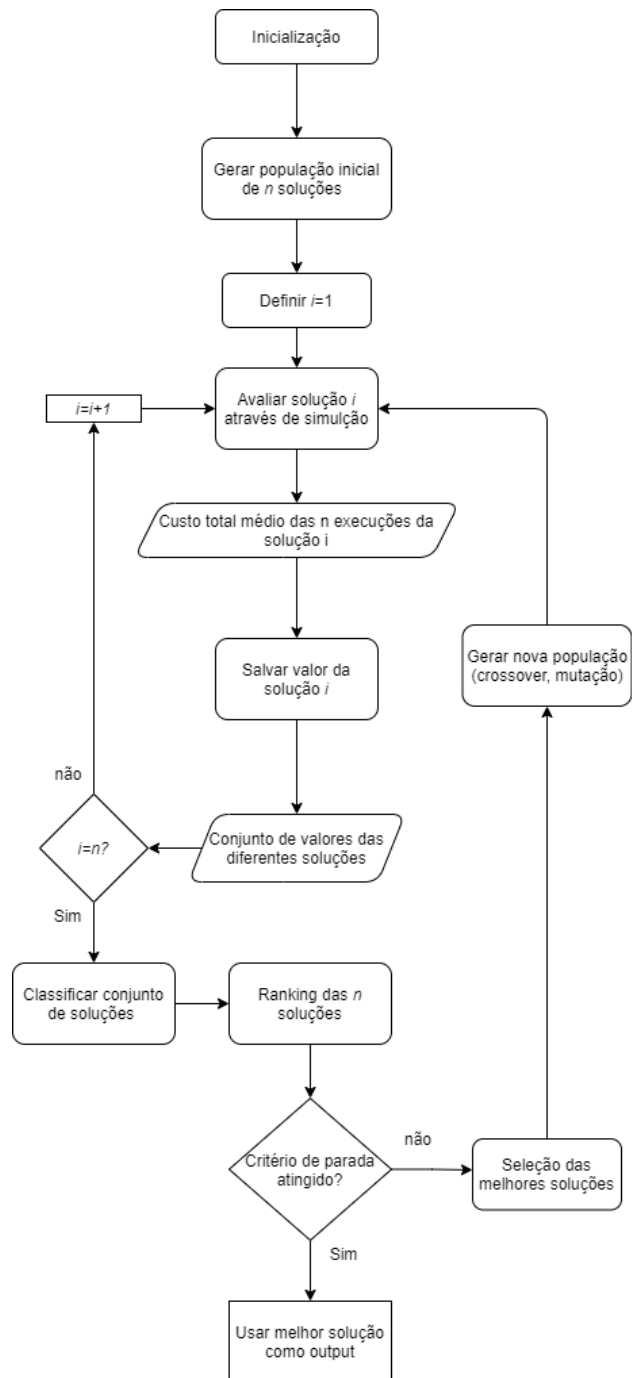
Dentro do grupo de artigos que exploram o desenvolvimento de metodologias eficientes para a resolução de problemas complexos, como é a integração de cadeias de suprimentos reais, pode-se observar uma predileção pela utilização de algoritmo genético sozinho ou combinado com outras abordagens. Quatro dos artigos analisados optaram pela utilização de AG para lidar de maneira eficiente com a complexidade dos modelos de integração desenvolvidos pelos autores.

Fahimnia et al. (2012), afirma que AG é capaz de lidar com um grande número de parâmetros de maneira efetiva, é mais rápido para encontrar ótimos globais em comparação com outras técnicas e gera várias soluções ótimas permitindo a escolha por parte do tomador de decisão. Jolai et al. (2011), desenvolve um algoritmo genético híbrido utilizando PSO para gerar a solução inicial para o procedimento do AG e obtém resultados superiores em relação aos pelo AG sozinho tempo razoável. Ma et al. (2016) também optam pela combinação de AG com outras técnicas obtendo resultados superiores na comparação com o AG isolado. E finalmente, Su et al. (2015) desenvolvem um algoritmo híbrido que combina, também, *particle swarm optimization* e AG com esquema de aprendizado. O algoritmo proposto pelos autores tem desempenho superior ao algoritmo genético convencional e ao algoritmo genético com esquema de aprendizado aplicados isoladamente.

Após essa análise pode-se concluir que AG's simples ou em combinação com outras técnicas é capaz de retornar resultados satisfatórios com tempos razoáveis de execução. Levando em consideração também a complexidade das CS's atuais, a utilização de AG se mostra mais adequada.

O fluxo do procedimento do Ag é o seguinte:

Figura 7: Fluxograma do algoritmo genético



Fonte: Adaptado de Lin; Chen (2015)

6.4 MIP

Como mencionado anteriormente as variáveis de decisões e restrições deverão ser primeiramente representadas através de um modelo MIP, no qual os processos estocásticos do mundo real seriam representados aqui pelo seu valor médio. Segundo Frazzon et al. (2018) a escolha da população inicial para inicialização do AG é de grande importância para a velocidade de convergência do algoritmo. O autor afirma ainda que os valores gerados pelo MIP não são uma boa representação do mundo real, porém é um bom ponto de partida para o AG. Por essa razão optou-se pela inclusão desse tipo de modelo no framework.

6.5 PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO DA METODOLOGIA HÍBRIDA

Como visto na figura 7, a simulação funcionará como função objetivo do algoritmo genético. Sua função será testar as soluções geradas pelo AG em uma situação próxima a real, considerando eventos dinâmicos e estocasticidade. Nesse sentido pode-se dizer que será um procedimento semelhante ao proposto por Varthanan et al. (2012), que combinou uma heurística com o simulação para resolver problemas com incertezas em relação a demandas. Nesse caso, os autores determinavam demandas máximas e mínimas para cada cliente baseando-se em dados históricos e as soluções geradas pela heurística proposta era testada diversas vezes (2000, por exemplo) com demandas aleatórias dentro dos limites pré-determinados. Através da simulação é calculado o custo total médio de cada solução com base nas n execuções do modelo para aquela solução. Novas soluções são geradas, testadas e comparadas com as antigas e o processo se repete por diversas interações (5000 por exemplo).

A heurística proposta para esse trabalho é algoritmo genético. Como já foi mencionado também, para gerar as soluções iniciais será utilizado um modelo de programação linear para simplificar o caso real, a partir daí as interações acontecerão com o algoritmo genético variando as soluções iniciais de acordo com um indicador de performance fornecido pela simulação, custo total médio do sistema para esse caso. O indicador de performance pode variar conforme objetivos específicos de cada empresa.

Uma parte fundamental de um framework no contexto da indústria 4.0 é a conexão entre todas as partes da cadeia e a troca de dados em tempo real entre o cenário real e o modelo

de simulação. Essa troca de dados é possibilitada através da utilização de sistemas do uso de sensores que dentro desse contexto compõe os sistemas ciber físicos, conceito fundamental da indústria 4.0. Essa tecnologia possibilita a troca de dados em tempo real entre sistema real e digital, como: ordens de produção, programação de rotas, planos de turnos, eventuais quebras de máquinas, dados sobre o processamento das ordens de produção e o atual estado das operações planejadas.

No framework o sistema real fornece dados em tempo real para o bloco de otimização baseado em simulação. Os dados são fornecidos para atualização do modelo de simulação em cada replanejamento das operações. Novos planejamentos são realizados de maneira periódica ou podem ser acionados por conta de eventos dinâmicos inesperados. Eventos que causam a atualização imediata, bem como uma nova execução, do modelo de simulação seriam quebra de máquinas, mudanças de turnos e mudanças nos pedidos.

As atualizações imediatas devem ser realizadas em relação ao número de máquinas disponíveis, os trabalhadores planejados para um turno, bem como as ordens de produção. Além disso as distribuições de probabilidade dos tempos de setup, tempos de processamento, tempo médio entre falhas e tempo médio de reparo para cada máquina também precisam ser atualizados periodicamente.

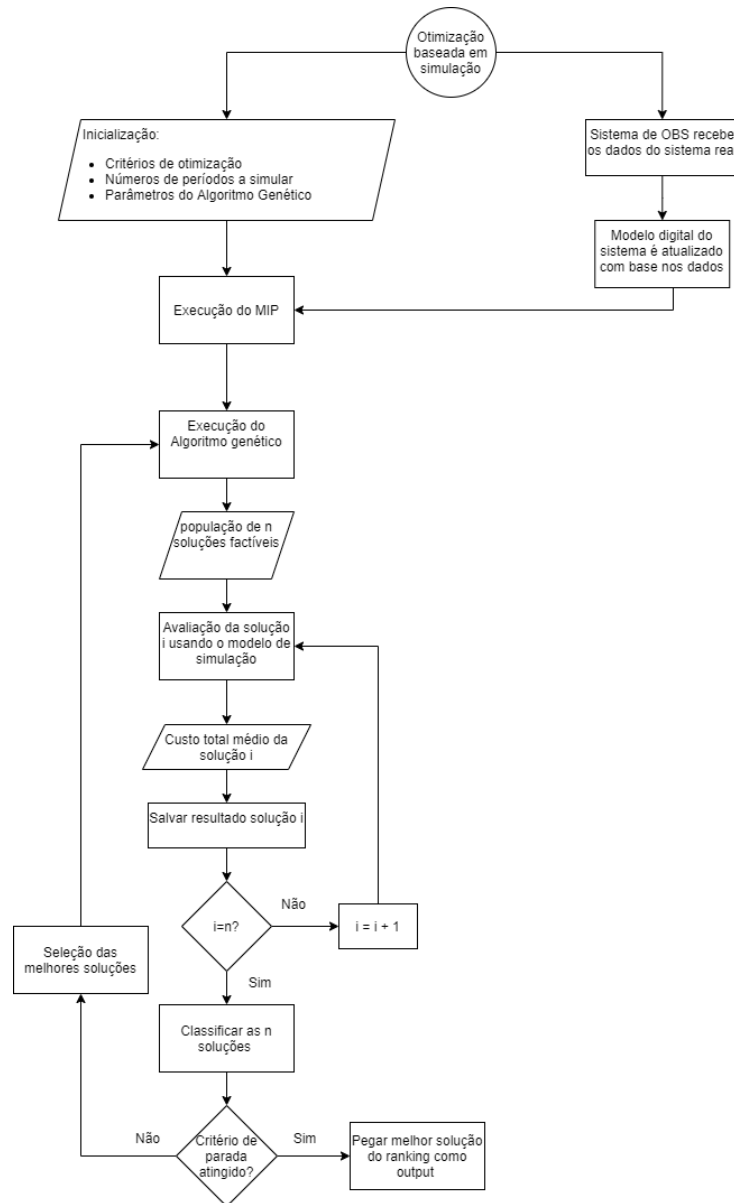
Após serem feitas as atualizações – periódicas ou acionadas por eventos inesperados – uma nova execução da otimização é conduzida para gerar um novo planejamento para o sistema, como regras de despacho, planejamento da distribuição, aquisição de matéria prima etc.

Ao final das iterações executadas pelo AG obtém-se um conjunto de soluções para cada etapa da cadeia que atenda de maneira satisfatória a critérios pré-determinados. Essas soluções passam ser testadas pelo modelo de simulação diversas vezes para que sejam avaliadas em uma situação próxima a real, ou seja, expostas às incertezas e estocasticidade do sistema. Depois de serem executadas as soluções são ranqueadas de acordo com o desempenho dos custos ao longo de todo o sistema. Ao final das interações, teremos a solução que, teoricamente, apresentaria o melhor desempenho no sistema real.

A melhor solução é implementada no sistema real até a próxima atualização periódica ou evento de acionamento da otimização.

O fluxograma da otimização baseada em simulação é apresentado a seguir:

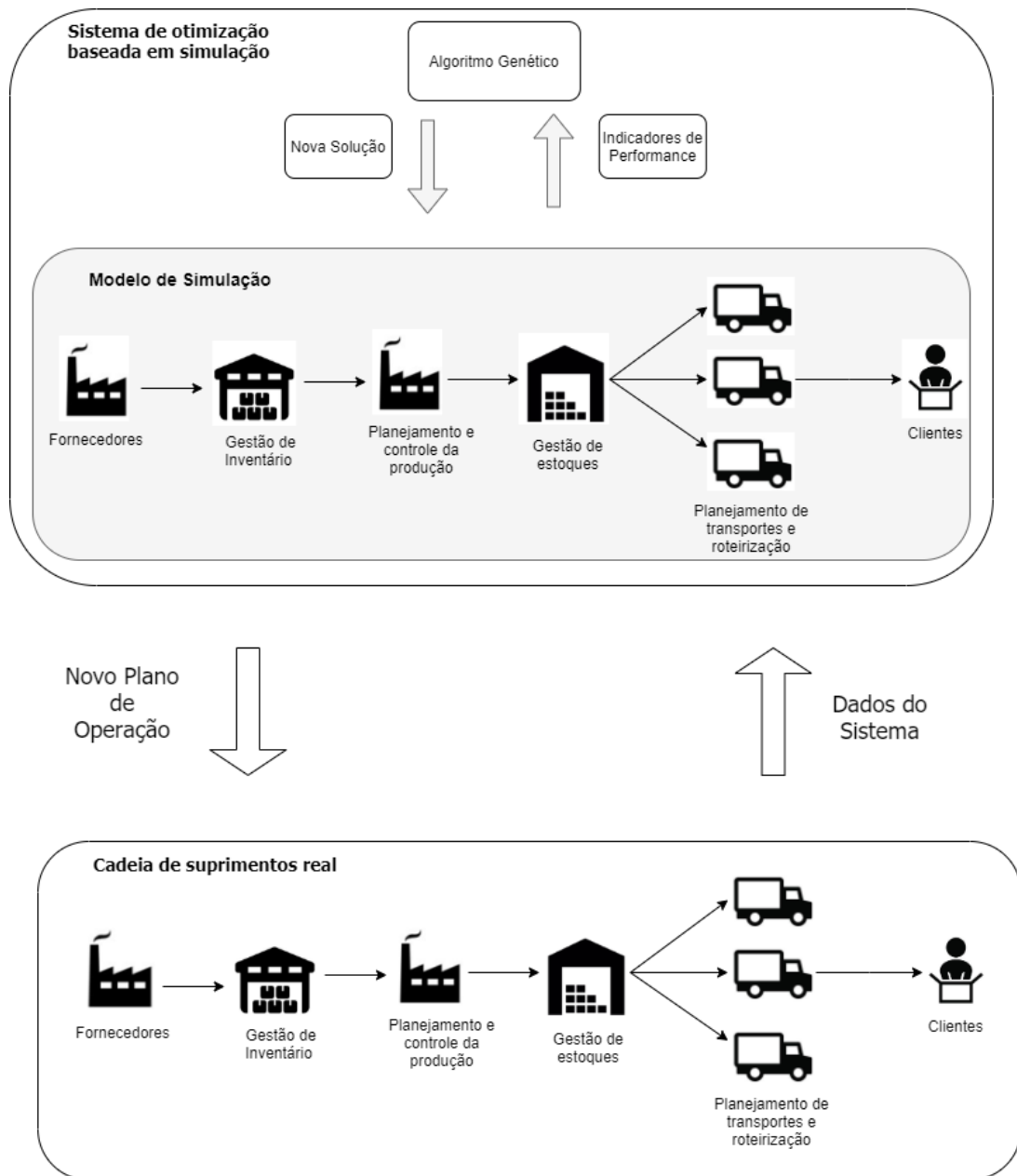
Figura 8: Fluxograma do sistema de otimização baseada em simulação



Fonte: Autoria própria

A figura 9 apresenta um esquema que mostra de maneira mais intuitiva como sistema real e digital interagem dentro do framework.

Figura 9: Framework de otimização baseada em simulação



Fonte: Autoria Própria

A troca de dados em tempo real possibilita a atualização automática do planejamento do sistema sem a necessidade de ação humana. Como já foi falado, os sistemas ciber físicos possibilitam essa troca de dados. Esses dados envolveriam: distribuições de probabilidade de tempos de entrega, de tempos de processamento de máquinas, de produtividade de trabalhadores, de tempos até falhas, de tempos para reparo etc.

Como pode ser visto na figura 10, o sistema real fornece os dados que alimentam o modelo de simulação. Por sua vez, o modelo de simulação se atualiza com base nos status das máquinas, meios de transporte, disponibilidade de trabalhadores entre outros. A troca de dados entre sistema real e digital é possível graças ao uso de sensores. Isso permite um planejamento considerando-se dados estocásticos e mais próximo da realidade em contraponto às soluções que utilizam apenas dados determinísticos. Além disso, essa propriedade de troca de dados em tempo real garante ao sistema maior responsividade e flexibilidade. Em teoria seria uma maneira prática de se contornar um dos problemas explorados por muitos autores que seria a dinamicidade das cadeias de suprimentos.

Cada atualização do sistema gera uma nova execução do processo de otimização baseado em simulação. O AG pode utilizar uma nova solução gerada pelo MILP ou utilizar a melhor solução da execução anterior para iniciar a nova execução. O algoritmo executa mutações nas soluções anteriores para gerar uma nova solução. Uma nova solução é uma nova combinação de parâmetros, como por exemplo estoques de segurança.

A simulação funciona como função objetivo, testando todas as soluções do AG diversas vezes para avaliar o desempenho médio em relação a um objetivo, como custo total do plano por exemplo. Nesse caso a solução é testada pela simulação diversas vezes para calcular seu custo total, o custo médio da e todas as execuções é utilizado como indicador de desempenho daquela solução. A melhor solução seria a de menor custo médio.

A escolha por simulação como função objetivo permite que as soluções seja exposta a um ambiente de incertezas similar ao real. Isso permite avaliar o comportamento do sistema de acordo com o planejamento gerado. Por exemplo, é possível avaliar o comportamento do sistema com relação a variações na demanda, permitindo planejar estoques de segurança da melhor maneira possível de maneira a gerar uma melhor *trade off*. É, novamente, importante destacar o papel da indústria 4.0 nesse aspecto. A utilização ampla de sensores para criação de

sistema digitais e físicos conectados é de vital importância para a representação digital de sistemas reais. Por meio da coleta de dados através de sensores é que se torna possível criar modelos digitais das cadeias reais de maneira mais próxima ao que é o real.

7. CONCLUSÃO

O planejamento integrado de cadeias de suprimentos tem potencial para oferecer vantagens competitivas para todos os elos da cadeia. Modelos para atingir ótimos globais ao se planejar as operações de cadeias de suprimentos já são bem explorados e estudados. Porém, ainda existem desafios para lidar com a natureza dinâmica de cadeias de suprimentos globais.

Ao se realizar a revisão de literatura pode-se observar que os artigos publicados focam principalmente em dois problemas: (1) o desenvolvimento de abordagens computacionalmente eficientes para realizar o planejamento integrado de cadeias de suprimentos e (2) a tentativa de conferir aos modelos propostos flexibilidade para lidar com a dinamicidade. Ao se identificar esses dois principais temas nos artigos analisados, foi atingido o objetivo específico “identificar os principais problemas abordados pelos autores que exploram a integração de cadeias de suprimentos”.

Em seguida, para atingir o objetivo específico “identificar os métodos de otimização utilizados para lidar com a integração de cadeias de suprimentos” foram analisados os artigos que buscavam o desenvolvimento de abordagens eficientes, já que esses artigos exploram maneiras eficientes de se lidar com a complexidade da otimização de cadeias de suprimentos inteiras. Pode-se observar uma predileção pelo uso de algoritmos genéticos sozinho ou combinados com outras técnicas, atingindo assim o objetivo específico.

Finalmente, pode-se observar que os artigos analisados na revisão de literatura pouco mencionam as tecnologias e conceitos da indústria 4.0. Assim, pode-se concluir que a indústria 4.0 ainda não foi suficientemente explorada dentro do tema do trabalho, atingindo assim o objetivo específico restante: “Analisar o impacto dos avanços proporcionados pela indústria 4.0 no planejamento integrado de cadeias de suprimentos”

A partir do que foi aprendido com base em uma revisão de literatura sistemática de artigos e no referencial teórico, um framework teórico para a otimização integrada de cadeias de suprimento foi proposto, atingindo o objetivo geral do trabalho. A análise da literatura foi a

base para o entendimento dos desafios enfrentados na otimização integrada de cadeias de suprimentos e as soluções propostas pelos principais autores da área. Além disso, procurou-se entender o impacto que a indústria 4.0 pode ter e os benefícios que pode trazer aos modelos existentes.

Grande esforço tem sido colocado em pesquisas visando gerar modelos eficiente para lidar com a integração da cadeia de suprimentos, principalmente no que diz respeito à produção e distribuição que é onde se concentra grande parte dos custos. Inúmeros modelos foram propostos para abordar esse tipo de problema. A combinação entre abordagens com objetivo de combinar vantagens e evitar desvantagens também pode ser observado na revisão de literatura. Ainda assim, mesmo com todos esses esforços, pouco se explora os impactos que a indústria 4.0 pode ter dentro desse contexto.

Por outro lado, alguns autores já demonstraram que as tecnologias da indústria 4.0 podem proporcionar maior flexibilidade e capacidade de adaptação em processos e operações dentro de cadeias de suprimentos. Mesmo com todos esses avanços são poucos os autores que buscam se aproveitar das vantagens proporcionadas por essas tecnologias em pesquisas ligadas ao planejamento e controle de operações na cadeia de suprimentos.

O trabalho apresentado buscou propor um framework que fosse capaz de lidar com algumas das fontes de incertezas presentes em cadeias de suprimentos. Além disso, o trabalho buscou mapear as variáveis e parâmetros de planejamento de cadeias de suprimentos abordados nos trabalhos analisado com finalidade de sugerir inclusão dos mesmo em futuras pesquisas que explorem metodologias híbridas de otimização e simulação. Assim, acredita-se ser possível a construção de modelos digitais cada vez mais próximos do real levando a resultados cada vez melhores.

O framework apresenta um procedimento para a utilização de algoritmo genético, MILP e simulação em conjunto para gerar resultados melhores que propiciem melhorias no desempenho de cadeias de suprimentos inseridas em ambientes competitivos. Os componentes foram escolhidos com base nos resultados alcançados nos artigos analisados na revisão de literatura. O algoritmo genético tem se demonstrado uma ferramenta eficiente em questões de custo computacional e resultados, o MILP serve como ponto de partida para o algoritmo genético e a simulação funciona como função objetivo do sistema. Daí a importância do desenvolvimento de modelos tão similares quanto possível ao mundo real. A capacidade da

simulação de avaliar o comportamento do sistema ao longo de um grande número de períodos é um dos pontos chave desse tipo de abordagem. Obviamente, o comportamento real muda ao longo do tempo, daí a importância da atualização constante dos modelos com ajuda da tecnologia existente.

Pesquisas anteriores demonstraram a eficiência da combinação de algumas dessas ferramentas, porém em cenários reduzidos, sem considerar cadeias inteiras. Este trabalho propõe uma abordagem similar, porém aplicada a cenários mais amplos, considerando fatores que ainda não foram abordados em conjunto dentro de um mesmo modelo. Apesar, desse tipo de abordagem ainda não ter sido testada em casos tão abrangentes na literatura, até onde se sabe, acredita-se que seja uma ferramenta capaz de gerar melhorias significativas.

Para pesquisas futuras, é fundamental que o framework seja testado em uma cadeia de suprimentos real. Além disso, devem ser exploradas outras abordagens de otimização como *particle swarm optimization* ou a combinação delas com algoritmo genético ou outros. Além disso, é possível adicionar outros processos que se fazem cada vez mais presentes e necessários, como logística reversa, por exemplo.

REFERÊNCIAS

BARRETO, L.; AMARAL, A.; PEREIRA, T. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1245–1252, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>>. .

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; JACOBS, J. C. Supply Chain and Logistics Management. **Supply Chain and Logistics Management**, 2002.

BUXMANN, P.; HEITZ, C.; HUTTER, H. P.; et al. Internet of services. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**, v. 7768 LNCS, p. 283–325, 2013.

CHAE, B. K.; OLSON, D.; SHEU, C. The impact of supply chain analytics on operational performance: A resource-based view. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 16, p. 4695–4710, 2014.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Estratégia, Planejamento, e Operação**. 2011.

DAS, K. Article information : , 2018.

DAVIS, J. Smart Manufacturing. **Encyclopedia of Sustainable Technologies**, v. 7543, p. 417–427, 2017. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>>. .

DAVIS, J.; EDGAR, T.; PORTER, J.; BERNADEN, J.; SARLI, M. Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. **Computers and Chemical Engineering**, v. 47, p. 145–156, 2012.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014. IEEE.

DREYER, H. C.; BJARTNES, R.; NETLAND, T.; STRANDHAGEN, J. O. Real-time supply chain planning and control - A case study from the norwegian food industry. **Innovations in Networks - Proceedings of the APMS 2008 Conference, An Event of the IFIP Working Group 5.7**, , n. January, p. 141–150, 2008.

EHM, J.; SCHOLZ-REITER, B.; MAKUSCHEWITZ, T.; FRAZZON, E. M. Graph-based integrated production and intermodal transport scheduling with capacity restrictions. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 9, p. 23–30, 2015. CIRP.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.01.007>>. .

FAHIMNIA, B.; FARAHAANI, R. Z.; SARKIS, J. Integrated aggregate supply chain planning using memetic algorithm - A performance analysis case study. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 18, p. 5354–5373, 2013.

FAHIMNIA, B.; LUONG, L.; MARIAN, R. Genetic algorithm optimisation of an integrated aggregate production-distribution plan in supply chains. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 1, p. 81–96, 2012.

FEENEY, A. B.; FRECHETTE, S. P.; SRINIVASAN, V. A Portrait of an ISO STEP Tolerancing Standard as an Enabler of Smart Manufacturing Systems. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, v. 15, n. 2, 2015.

FRAZZON, E. M.; ALBRECHT, A.; HURTADO, P. A.; DE SOUZA SILVA, L.; PANNEK, J. Hybrid modelling approach for the scheduling and control of integrated production and logistic processes along export supply chains. **IFAC-PapersOnLine**, v. 28, n. 3, p. 1521–1526, 2015.

FRAZZON, E. M.; ALBRECHT, A.; PIRES, M.; et al. Hybrid approach for the integrated scheduling of production and transport processes along supply chains. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 5, p. 2019–2035, 2018. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1355118>>. .

FRAZZON, E. M.; HARTMANN, J.; MAKUSCHEWITZ, T.; SCHOLZ-REITER, B. Towards socio-cyber-physical systems in production networks. **Procedia CIRP**, v. 7, p. 49–54, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.009>>. .

FRAZZON, E. M.; RODRIGUEZ, C. M. T.; PEREIRA, M. M.; PIRES, M. C.; UHLMANN, I. Towards Supply Chain Management 4.0. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 16, n. 2, p. 180–191, 2019. Disponível em: <<https://bjopm.emnuvens.com.br/bjopm/article/view/539>>. .

FREITAG, M.; HILDEBRANDT, T. Automatic design of scheduling rules for complex manufacturing systems by multi-objective simulation-based optimization. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1, p. 433–436, 2016. CIRP. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.066>>. .

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. **Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System**

Sciences, v. 2016-March, p. 3928–3937, 2016. IEEE.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B.; PENTEK, T. *. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review Competence Center Corporate Data Quality (CC CDQ) View project Industrial Data Space View project Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. **Business Engineering Institute St. Gallen**, , n. September 2016, p. 16, 2015. Disponível em: <www.snom.mb.tu-dortmund.de>. .

HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23–34, 2017.

HOSSAIN, M. S.; HOSSAIN, M. M. Application of interactive fuzzy goal programming for multi-objective integrated production and distribution planning. **International Journal of Process Management and Benchmarking**, v. 8, n. 1, p. 35–58, 2018.

HUBNER, A. H.; KUHN, H.; STERNBECK, M. Demand and supply chain planning in grocery retail: An operations planning framework. , v. 41, p. 512–530, 2013.

IVANOV, D.; SOKOLOV, B.; KAESCHEL, J. Integrated supply chain planning based on a combined application of operations research and optimal control. **Central European Journal of Operations Research**, v. 19, n. 3, p. 299–317, 2011.

JOLAI, F.; RAZMI, J.; ROSTAMI, N. K. M. A fuzzy goal programming and meta heuristic algorithms for solving integrated production: Distribution planning problem. **Central European Journal of Operations Research**, v. 19, n. 4, p. 547–569, 2011.

JUNG, J. Y.; BLAU, G.; PEKNY, J. F.; REKLAITIS, G. V.; EVERSDYK, D. A simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty. **Computers and Chemical Engineering**, v. 28, n. 10, p. 2087–2106, 2004.

KHAN, M.; JABER, M. Y.; AHMAD, A. R. An integrated supply chain model with errors in quality inspection and learning in production. **Omega (United Kingdom)**, v. 42, n. 1, p. 16–24, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.002>>. .

KUCK, M.; BRODA, E.; FREITAG, M.; HILDEBRANDT, T.; FRAZZON, E. M. Towards adaptive simulation-based optimization to select individual dispatching rules for production control. Proceedings - Winter Simulation Conference. **Anais...** , 2018.

KUCK, M.; EHM, J.; HILDEBRANDT, T.; FREITAG, M.; FRAZZON, E. M. Potential of data-driven simulation-based optimization for adaptive scheduling and control of

dynamic manufacturing systems. **Proceedings - Winter Simulation Conference**, v. 0, p. 2820–2831, 2016.

KUSIAK, A. Smart Manufacturing. **Encyclopedia of Sustainable Technologies**, v. 7543, p. 417–427, 2017. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>>. .

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, 2015. Society of Manufacturing Engineers (SME). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>>. .

LEE, J.; LAPIRA, E.; YANG, S.; KAO, A. **Predictive manufacturing system - Trends of next-generation production systems**. IFAC, 2013.

LI, B. HU; HOU, B. CUN; YU, W. TAO; LU, X. BING; YANG, C. WEI. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. **Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering**, v. 18, n. 1, p. 86–96, 2017.

LIANG, T. F. Integrated manufacturing/distribution planning decisions with multiple imprecise goals in an uncertain environment. **Quality and Quantity**, v. 46, n. 1, p. 137–153, 2012.

LIAO, Y.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E. DE F. R.; RAMOS, L. F. P. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 12, p. 3609–3629, 2017. Taylor & Francis. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>>. .

LIN, J. T.; CHEN, C. M. Simulation optimization approach for hybrid flow shop scheduling problem in semiconductor back-end manufacturing. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 51, p. 100–114, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2014.10.008>>. .

LIOTTA, G.; KAIHARA, T.; STECCA, G. Optimization and Simulation of Collaborative Networks for Sustainable Production and Transportation. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 12, n. 1, p. 417–424, 2016. IEEE.

LIU, C.; WANG, J.; LEUNG, J. Y. T. Integrated bacteria foraging algorithm for cellular manufacturing in supply chain considering facility transfer and production planning. **Applied Soft Computing Journal**, v. 62, p. 602–618, 2018. Elsevier B.V. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2017.10.034>>. .

MA, Y.; YAN, F.; KANG, K.; WEI, X. A novel integrated production-distribution planning model with conflict and coordination in a supply chain network. **Knowledge-Based Systems**, v. 105, p. 119–133, 2016. Elsevier B.V.

MAIER, M. A.; KORBEL, J. J.; BREM, A. Innovation in supply chains - Solving the agency dilemma in supply networks by using industry 4.0 technologies. **International Journal of Communication Networks and Distributed Systems**, v. 15, n. 2–3, p. 235–247, 2015.

MIRANDA, P. A.; TAPIA-UBEDA, F. J.; HERNANDEZ, V.; CARDENAS, H.; LOPEZ-CAMPOS, M. A simulation based modelling approach to jointly support and evaluate spare parts supply chain network and maintenance system. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 2231–2236, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.537>>. .

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **PLoS Medicine**, v. 6, n. 7, 2009.

MOURTZIS, D.; DOUKAS, M.; PSAROMMATIS, F. Design and operation of manufacturing networks for mass customisation. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, n. 1, p. 467–470, 2013. CIRP. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.126>>. .

MULA, J.; PEIDRO, D.; DÍAZ-MADROÑERO, M.; VICENS, E. Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. **European Journal of Operational Research**, v. 204, n. 3, p. 377–390, 2010. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.09.008>>. .

PEREIRA, A.; SIMONETTO, E. D. O.; PUTNIK, G.; CASTRO, H. C. G. A. DE. How connectivity and search for producers impact production in Industry 4.0 networks. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n. 4, p. 528–534, 2018.

PIEWTHONGNGAM, K.; PATHUMNAKUL, S.; HOMKHAMPAD, S. An interactive approach to optimize production-distribution planning for an integrated feed swinecompany. **International Journal of Production Economics**, v. 142, n. 2, p. 290–301, 2013. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.11.011>>. .

PIRARD, F.; IASSINOVSKI, S.; RIANE, F. A simulation based approach for supply

network control. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 24, p. 7205–7226, 2011.

PIRES, M. C.; FRAZZON, E. M.; CARREIRÃO DANIELLI, A. M.; KÜCK, M.; FREITAG, M. Towards a simulation-based optimization approach to integrate supply chain planning and control. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 520–525, 2018.

RAJKUMAR, R. A cyber-physical future. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. SPL CONTENT, p. 1309–1312, 2012.

SCHWARTZ, J. D.; WANG, W.; RIVERA, D. E. Simulation-based optimization of process control policies for inventory management in supply chains. **Automatica**, v. 42, n. 8, p. 1311–1320, 2006.

SEURING, S.; GOLD, S. Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. **Supply Chain Management**, v. 17, n. 5, p. 544–555, 2012.

SHAH, N. K.; IERAPETRITOU, M. G. Integrated production planning and scheduling optimization of multisite, multiproduct process industry. **Computers and Chemical Engineering**, v. 37, p. 214–226, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.08.007>>. .

SHEN, W.; NORRIE, D. Agent-based intelligent manufacturing systems: a state-of-the-art survey. **Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao/Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics**, v. 33, n. 1, p. 1, 2001.

SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. , 2005.

STEINRÜCKE, M. An approach to integrate production-transportation planning and scheduling in an aluminium supply chain network. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 21, p. 6559–6583, 2011.

SU, W.; HUANG, S. X.; FAN, Y. S.; MAK, K. L. Integrated partner selection and production-distribution planning for manufacturing chains. **Computers and Industrial Engineering**, v. 84, p. 32–42, 2015.

THOBEN, K. D.; WIESNER, S. A.; WUEST, T. “Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examples. **International Journal of Automation Technology**, v. 11, n. 1, p. 4–16, 2017.

THOMAS, D. J.; GRIFFIN, P. M. Coordinated supply chain management. **European**

Journal of Operational Research, v. 94, n. 1, p. 1–15, 1996.

VALLANDINGHAM, L. R.; YU, Q.; SHARMA, N.; STRANDHAGEN, J. W.; STRANDHAGEN, J. O. Grocery retail supply chain planning and control: Impact of consumer trends and enabling technologies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 11, p. 612–617, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.386>>. .

VARTHANAN, P. A.; MURUGAN, N.; KUMAR, G. M. A simulation based heuristic discrete particle swarm algorithm for generating integrated production-distribution plan. **Applied Soft Computing Journal**, v. 12, n. 9, p. 3034–3050, 2012. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2012.05.001>>. .

WAN, J.; TANG, S.; LI, D.; et al. A Manufacturing Big Data Solution for Active Preventive Maintenance. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 13, n. 4, p. 2039–2047, 2017.

WANG, S.; WAN, J.; ZHANG, D.; LI, D.; ZHANG, C. Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. **Computer Networks**, v. 101, p. 158–168, 2016.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017. Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>>. .