UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

THAIS CAMPOS LUCAS

DESENVOLVIMENTO DE MODELO MULTIOBJETIVO PARA PROJETO E GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS RESILIENTES E SUSTENTÁVEIS

Recife
2021

THAIS CAMPOS LUCAS

DESENVOLVIMENTO DE MODELO MULTIOBJETIVO PARA PROJETO E GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS RESILIENTES E SUSTENTÁVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura

Recife

2021

Catalogação na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

L933d Lucas, Thais Campos
Desenvolvimento de modelo multiobjetivo para projeto e gestão de cadeias de suprimentos resilientes e sustentáveis / Thais Campos Lucas – Recife, 2021.
105 f.: figs., tabs.

Orientadora: Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2021.
Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Projeto de cadeias de suprimento. 3. Resiliência. 4. Sustentabilidade. 5. Algoritmo genético multiobjetivo. I. Moura, Márcio José das Chagas (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.) BCTG / 2021 - 168

THAÍS CAMPOS LUCAS

DESENVOLVIMENTO DE MODELO MULTIOBJETIVO PARA PROJETO E GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS RESILIENTES E SUSTENTÁVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 18 / 02 / 2021 .

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profª. Drª. Isis Didier Lins (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo

“Há todo um velho mundo ainda por destruir
e todo um novo mundo a construir.
Mas nós conseguiremos,
jovens amigos, não é verdade?”

Rosa Luxemburgo

Dedico à minha mãe e às minhas irmãs,

Que sempre acreditaram em mim e me inspiraram.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos mais calorosos deste trabalho vão para os meus pais, que sempre valorizaram a importância da educação, e fizeram de tudo para que eu alcançasse a formação superior que eles não tiveram a oportunidade de iniciar. Agradeço também às minhas irmãs, Iris e Lívia, que serviram de exemplo para mim ao seguir o caminho aberto pelos nossos pais e me fizeram ir além.

Agradeço a Dilton, por ter ficado do meu lado nos momentos que precisei de apoio e por me encorajar a ir além e me ajudar a concluir minha dissertação.

Agradeço aos professores da UFPE que tive a chance de aprender lições que vão além do âmbito acadêmico e profissional ao longo desta caminhada. Agradeço especialmente ao professor Márcio pela dedicação e orientação neste trabalho e durante o período de iniciação científica. Sou grata também à professora Isis Didier, que me auxiliou não só neste trabalho, ao ser revisora, como em outros durante os dois anos de mestrado.

Agradeço aos colegas do PPGEP-UFPE, principalmente os que estiveram comigo durante as disciplinas, que se dispuseram a tornar melhor a experiência dentro da universidade.

Aos colegas do CEERMA pelo apoio e pelas sugestões a cerca deste trabalho. Não posso deixar de destacar meus colegas de ingresso no mestrado, Marcela e Hiago, que trilharam comigo por vários caminhos de aprendizagem e desafios.

Ao CNPq, pelo apoio e pelas oportunidades durante os anos de pesquisa desde a iniciação científica e à CAPES pelo apoio imprescindível durante todo o mestrado.

RESUMO

Projetar uma Cadeia de Suprimentos (CS) requer a tomada de decisões estratégicas, tanto de longo como de curto prazos. Em ambos os tipos, têm-se como característica impactar o retorno do investimento e o desempenho da rede. Além disso, o aumento das expectativas de nível de serviço e questões de sustentabilidade trazem desafios importantes para as organizações. Desta forma, além de considerar a performance da CS, os decisores precisam avaliar a exposição da rede a eventos perturbadores. Nesse contexto, este trabalho propõe um modelo de otimização multiobjetivo para o problema da definição do projeto de uma CS, que visa avaliar a incorporação de resiliência à rede, considerando aspectos econômicos, ambientais e sociais para avaliar as decisões de configuração e operação da cadeia. Este trabalho considera um algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) para resolver o modelo proposto, em que decisões de projeto envolvem as instalações, como aumento de capacidade e construção de novas unidades que comporão a CS, considerando que ela estará exposta a interrupções externas. Além disso, um exemplo baseado em um exemplo de CS da literatura, adaptado à realidade da indústria alimentícia é apresentado e se analisa um caso de projeto inicial de rede de suprimentos e um caso de redesenho de uma rede preexistente, onde cenários são investigados a fim de definir e avaliar os possíveis resultados de eventos perturbadores. Ao fim, o desempenho das diferentes configurações de rede obtidas como soluções em cada caso é comparado de acordo com seu desempenho nos objetivos considerados.

Palavras-chave: Projeto de cadeias de suprimento. Resiliência. Sustentabilidade. Algoritmo Genético multiobjetivo.

ABSTRACT

Designing a Supply Chain (SC) requires strategic decision making, both long and short term. In both types, the characteristic is to impact the return on investment and the performance of the network. In addition, rising service level expectations and sustainability issues pose important challenges for organizations. Thus, in addition to considering the SC performance, decision makers need to assess the network's exposure to disturbing events. In this context, this work proposes a multiobjective optimization model for the problem of defining a SC project, which aims to assess the incorporation of resilience to the network, considering economic, environmental, and social aspects to assess configuration and operation decisions for the chains. This work considers a multiobjective genetic algorithm (MOGA) to solve the proposed model, in which design decisions involve installations, such as increasing capacity and building new units that will compose the SC, considering that it will be exposed to external interruptions. In addition, an example based on a SC literature case, adapted to the reality of the food industry is presented and a case of initial supply network design and a case of redesign of a pre-existing network is analyzed, where scenarios are investigated to define and evaluate the possible results of disturbing events. In the end, the performance of the different network configurations obtained as solutions in each case is compared according to their performance in the considered objectives.

Keywords: Supply Chain Design. Resilience. Sustainability. Multiobjective Genetic Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Procedimento de crossover 30
Figura 2 - Processo de mutação 31
Figura 3 - Exemplo de cadeia de suprimento 35
Figura 4 - Fluxograma do algoritmo genético multiobjetivo proposto.....51
Figura 5 - Pseudocódigo do procedimento de SELEÇÃO e ATUALIZAÇÃO da população auxiliar.....54
Figura 6 - Pseudocódigo do CROSSOVER.....55
Figura 7 - Pseudocódigo da MUTAÇÃO 56
Figura 8 - Mapa com área de atendimento da demanda e localização de fornecedores, manufaturas e armazéns 57
Figura 9 - Arranjos obtidos no caso de projeto inicial de rede.....65
Figura 10 - Gráfico da resiliência crescente no caso de projeto inicial 66
Figura 11 - Arranjos obtidos no caso de redesenho de rede.....78
Figura 12 - Gráfico da resiliência crescente para o caso de redesenho da rede de suprimentos 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conjuntos da modelagem proposta 36
Tabela 2 - Variáveis de decisão da modelagem proposta.....36
Tabela 3 - Parâmetros da modelagem proposta 37
Tabela 4 - Parâmetros do algoritmo genético multiobjetivo 50
Tabela 5 - Quantidade e localização de manufaturas, armazéns e clientes da rede.....58
Tabela 6 - Custos fixo e variável de cada manufatura.....58
Tabela 7 - Custos fixo e variável de cada armazém 58
Tabela 8 - Capacidades dos armazéns 58
Tabela 9 - Investimento para construir cada instalação 59
Tabela 10 - Custos e emissões de transporte entre manufaturas e armazéns.....59
Tabela 11 - Demandas dos clientes da rede.....59
Tabela 12 - Custos e emissões do transporte dos armazéns aos clientes da rede.....61
Tabela 13 - Cenários disruptivos e suas probabilidades.....62
Tabela 14 -Cenários disruptivos e suas probabilidades.....62
Tabela 15 - Resultados para todos os arranjos no caso de projeto inicial 67
Tabela 16 - Resultados arranjo M2 e W1 abertos no caso de projeto inicial 67
Tabela 17 - Resultados arranjo M2 e W5 abertos no caso de projeto inicial 67
Tabela 18 - Resultados arranjo com todas as instalações abertas no caso de projeto inicial .67
Tabela 19 - Resultados para todos os arranjos no caso de projeto inicial sem a função investimento.....68
Tabela 20 - Resultados para M2 e W5 abertos no caso de projeto inicial sem função investimento.....69
Tabela 21 - Resultados para todas as instalações abertas no caso de projeto inicial sem função investimento.....69
Tabela 22 - Resultados para M1 W5 abertas no caso de projeto inicial sem função investimento.....69
Tabela 23 - Resultados para M2 W1 abertas no caso de projeto inicial sem função investimento.....69
Tabela 24 - Resultados para todos os arranjos sem função resiliência 70
Tabela 25 - Resultados para M2 W5 sem função resiliência.....71
Tabela 26 - Resultados para M1 W5 sem função resiliência.....71
Tabela 27 - Resultado para M1 W3 sem função resiliência 71

Tabela 28 - Resultados para todos os arranjos sem função lucro 72
Tabela 29 - Resultados para M2 W1 sem função lucro 72
Tabela 30 - Resultados para M2 W5 sem função lucro 73
Tabela 31 - Resultados para M1 W3 sem função lucro 73
Tabela 32 - Resultados para M1 W1 sem função lucro 73
Tabela 33 - Resultados para todas as instalações abertas sem função lucro 73
Tabela 34 Resultados para M1 W5 sem função lucro 74
Tabela 35 Resultados para M1 W2 sem função lucro 74
Tabela 36 - Resultados para todos os arranjos sem função ambiental 75
Tabela 37 - Resultados para todas as instalações abertas sem função ambiental 75
Tabela 38 - Resultados para M2 W1 sem função ambiental 75
Tabela 39 - Resultados para M2 W5 sem função ambiental 75
Tabela 40: Resultados para M2 W5 W6 sem função ambiental.....76
Tabela 41 Resultados para todos os arranjos sem função social 76
Tabela 42 - Resultados para M2 W5 sem função social.....77
Tabela 43 - Resultados para M2 W1 sem função social.....77
Tabela 44 - Resultados para todas as instalações abertas sem função social 77
Tabela 45 - Resultados com todos os arranjos para o caso de redesenho.....80
Tabela 46 - Resultados arranjo M2 W1 abertos para o caso de redesenho 80
Tabela 47 - Resultados arranjo M2, W1 e W5 abertos para o caso de redesenho.....80
Tabela 48 - Resultados arranjo com todas as instalações abertas para o caso de redesenho..81
Tabela 49 – Resultados de todos os arranjos no caso de redesenho sem função investimento 82
Tabela 50 - Resultados para M2 e W1 abertos no caso de redesenho sem função investimento.....82
Tabela 51 - Resultados para todas as instalações abertas no caso de redesenho sem função investimento.....82
Tabela 52 - Resultados para M2 W1 e W5 abertas no caso de redesenho sem função investimento.....82
Tabela 53 - Resultados para todos os arranjos no caso de redesenho sem função resiliência83
Tabela 54 - Resultados para M2 W1 no caso de redesenho sem função resiliência 84
Tabela 55 - Resultados para M2 W1 e W5 no caso de redesenho sem função resiliência 84
Tabela 56 - Resultados para todos os arranjos no caso de redesenho sem função lucro 85
Tabela 57 - Resultados para M2 W1 W5 no caso de redesenho sem função lucro 85

Tabela 58 - Resultados para todas as instalações abertas para o caso de redesenho sem função lucro 85
Tabela 59 - Resultados para todos os arranjos no caso de redesenho sem função ambiental 86
Tabela 60 - Resultados para todas as instalações abertas no caso de redesenho sem função ambiental....86
Tabela 61 - Resultados para M2 W1 no caso de redesenho sem função ambiental 86
Tabela 62 - Resultados para M2 W1 W5 no caso de redesenho sem função ambiental 86
Tabela 63 - Resultados para todos os arranjos no caso de redesenho sem função social 87
Tabela 64 -Resultados para M2 W1 no caso de redesenho sem função social....87
Tabela 65 - Resultados para M2 W1 W5 no caso de redesenho sem função social 88
Tabela 66 - Resultados para todas as instalações abertas no caso de redesenho sem função social 88
Tabela 67 - Resultados obtidos por Validi (2014)....89
Tabela 68 - Resultados para todos os arranjos obtidos....89
Tabela 69 - Armazéns W5 e W6 abertos....90
Tabela 70 - Armazém W5 aberto....90
Tabela 71 - Armazém W1 aberto....90
Tabela 72 - Investimento para abrir cada tipo de instalação 91
Tabela 73 - Cenários e impactos nas capacidades de cada instalação....91
Tabela 74 - Resultados para todos os arranjos obtidos....92
Tabela 75 - Manufatura M2 e armazém W1 abertos 92
Tabela 76 - Manufatura M1 e armazém W5 abertos 92
Tabela 77 - Manufatura M2 e armazém W5 abertos 93
Tabela 78 - Todas as instalações abertas 93
Tabela 79 - Solução com manufatura M2 e armazém W6 abertos....93
Tabela 80 - Resultados para no caso com menores impactos nas capacidades....94
Tabela 81 - Resultados para todos os arranjos obtidos....95
Tabela 82 - Resultados para todas as instalações abertas 95
Tabela 83 - Resultados para as instalações M2 W1 e W5 abertas....95
Tabela 84 - Resultados para as instalações M2 e W1 abertas 95
Tabela 85 - Solução com manufatura M2 e armazéns W1, W5 e W6 abertos 96
Tabela 86 - Resultados para todos os arranjos obtidos....97
Tabela 87 - Resultados arranjo M2, W1 e W5 abertos....97
Tabela 88 - Resultados arranjo M2 W1 abertos 97

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

1.1 Justificativa 18

1.2 Objetivos 19

1.2.1 Objetivo geral 19

1.2.2 Objetivos específicos 20

1.2.3 Organização da dissertação 20

2 REFERENCIAL TEÓRICO 21

2.1 Resiliência na cadeia de suprimentos 21

2.2 Sustentabilidade na cadeia de suprimentos 22

2.3 Problemas multiobjetivo 26

2.4 Algoritmos genéticos 27

2.4.1 Algoritmos genéticos multiobjetivo 28

2.4.2 Operadores genéticos 30

2.4.3 Parâmetros Evolutivos 31

3 MODELAGEM MATEMÁTICA 33

3.1 Metodologia 33

3.2 Premissas do modelo 35

3.3 Variáveis e parâmetros do modelo 36

3.4 Função investimento 37

3.5 Função resiliência 38

3.6 Função lucro 39

3.7 Função impacto ambiental 41

3.8 Função impacto social 42

3.9 Restrições do problema 44

3.10 Algoritmo genético multiobjetivo 49

3.10.1 Geração da população inicial 51

3.10.2 Seleção e atualização da população auxiliar (Φaux) 53
3.10.3 Regras de *crossover* 54
3.10.4 Regras de mutação 56
4 PROBLEMA ANALISADO 57
5 RESULTADOS 64
5.1 Decisão de projeto inicial de rede de suprimentos 64
5.1.1 Sem a função investimento 68
5.1.2 Sem a função resiliência 70
5.1.3 Sem a função lucro 72
5.1.4 Sem a função impacto ambiental 74
5.1.5 Sem a função impacto social 76
5.2 Decisão de redesenho de rede de suprimentos 78
5.2.1 Sem a função investimento 81
5.2.2 Sem a função resiliência 83
5.2.3 Sem a função lucro 84
5.2.4 Sem a função impacto ambiental 85
5.2.5 Sem a função impacto social 87
5.3 Comparação com os resultados de Validi (2014) 89
5.4 Testando diferentes parâmetros 91
5.4.1 Custos iguais para abrir instalações no caso de projeto inicial 92
5.4.2 Menores impactos nas capacidades no caso de projeto inicial 94
5.4.3 Custos iguais de abrir instalações no caso de redesenho 95
5.4.4 Menores impactos nas capacidades no caso de redesenho 96
6 CONCLUSÕES 99
REFERÊNCIAS 101

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Chopra e Meindl (2003), a cadeia de suprimentos compreende todos os estágios envolvidos, de forma direta ou não, no atendimento ao pedido do cliente. Tal conceito abrange além de fabricantes e fornecedores, atingindo transportadoras, varejistas e depósitos. Além disso, abrange todas as funções envolvidas no pedido do cliente, sendo forte a presença do dinamismo, fluxo constante de informação, produtos e fundos entre os diferentes estágios e processos que a compõem.

O Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (GCS) vem sendo aplicado em vários contextos desde que Oliver e Webber (1982) apresentaram a relevância dessa discussão para aumentar o valor tanto para os clientes quanto para os acionistas, por meio da integração entre todos os membros da cadeia. Essa concepção surgiu da combinação de conceitos já conhecidos de logística e gestão de operações, aliados a outros como: compras, gestão de pedidos e estoque, planejamento e controle da produção, e atendimento ao cliente (CHRISTOPHER e PECK, 2004).

Ao inserir a sustentabilidade na cadeia de suprimentos, Bouchery *et al.* (2016) trazem uma definição admitidamente frouxa de que uma cadeia de suprimentos mais sustentável é a que identifica os impactos, tanto atuais como futuros, da sua operação no meio ambiente e na sociedade e consegue mitigá-los. Os autores também trazem que o sucesso de uma organização depende da sua consciência dos aspectos sociais, ambientais e econômicos de sua cadeia como um todo.

Em um mercado que presencia cada vez mais competitividade devido ao processo de globalização, o desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos eficiente tem o potencial de reduzir os custos relacionados à produção, ao armazenamento e ao transporte, além de garantir expectativas das partes interessadas e maiores lucros (DIABAT e AL-SALEM, 2014).

De acordo com a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED – *World Commission on Environment and Development*) (1987), desenvolvimento sustentável é a satisfação das necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas próprias necessidades. Para que tal desenvolvimento ocorra, decisões estratégicas de longo prazo, em relação ao número, à localização, à capacidade e ao tipo de instalações na rede, que têm um grande efeito sobre o retorno do investimento e o desempenho geral da rede (Seuring e Müller, 2008). Além disso, os clientes têm exigido que os

produtos estejam no local e hora desejados, aumentando as expectativas de nível de serviço (CHRISTOPHER, 2004).

Seric *et al.* (2020) ressaltam que aspecto importante para a abordagem de GCS é a internacionalização das cadeias de suprimentos e o aumento das Cadeias de Valor Globais (CVG), gerando aumento na complexidade e na vulnerabilidade, submetendo toda a rede a interrupções nos fluxos de informação, de capital ou material (Christopher e Peck, 2004; Bradley, 2014). Neste contexto, redundância e flexibilidade tornam-se substanciais para melhorar a resiliência nas respostas das organizações às interrupções. Apesar dos custos financeiros adicionais, no desempenho diário, os benefícios dessa estratégia são reconhecíveis (SHEFFI e RICE, 2005).

Para lidar com tais desafios no contexto da GCS, Peck *et al.* (2003) ressaltam a importância do conceito de rede, visto que as cadeias de suprimentos atuais não são lineares, mas sim compostas por redes complexas que trazem produtos e informações em seus nós ligando organizações, indústrias e economias. Neste contexto, a resiliência seria caracterizada como a capacidade de retornar ao estado original, ou ao mais desejado. Este conceito traz implícita a ideia de flexibilidade na rede da cadeia de suprimentos e a de adaptabilidade, visto que o estado mais desejado pode não ser o inicial.

Além disso, graças às crescentes pressões do mercado, há uma tendência entre os tomadores de decisão de mudar a atitude reativa geralmente adotada e, assim, incorporar o conceito de resiliência para o desenvolvimento de cadeias de suprimento, como forma de identificar alternativas antes da ocorrência de interrupções (Heckmann *et al.*, 2015). Apesar da crescente importância da resiliência em várias aplicações, ainda existe um número significativo de definições distintas, que evidenciam falta de padronização para a avaliação da resiliência, quantitativa e qualitativamente (HENRY e RAMIREZ-MARQUEZ, 2014).

Embora resultados fixos e incertezas estejam conectados à robustez e vulnerabilidade, a resiliência do sistema é influenciada por muitos eventos perturbadores (Aven, 2011). O desenvolvimento de estratégias para apoiar o processo de decisão de alocação de recursos é necessário para gerenciar uma variedade de cenários e suas consequências. Para lidar com esse desafio, ferramentas de GCS e estruturas de decisão foram projetadas. Apesar dos esforços para avaliar os riscos da cadeia de abastecimento, as taxas de interrupção continuam a aumentar, o que de acordo com Khan e Perez (2019), resultou em aumento de 36% nos eventos de risco das cadeias de abastecimento globais no ano de 2018, revelando que mais estudos podem ser feitos.

Com a ocorrência da pandemia de COVID-19, os debates sobre resiliência em cadeias de suprimentos estão mais frequentes, e devido a problemas nas cadeias de suprimentos que

operam para combater a pandemia, hospitais e sistemas de saúde tiveram que tomar medidas para se adaptarem a esse novo cenário (Patrinley *et al.* 2020). Aliado ao fato de que a literatura contém trabalhos escassos que expliquem os efeitos de uma pandemia na cadeia de suprimentos, ou que apliquem métodos sistemáticos de gestão da cadeia de suprimentos nesses cenários (Queiroz et al., 2020), construir e aplicar novos modelos de gestão da cadeia de suprimentos é bastante relevante para a sociedade.

A pandemia causada pelo SARS-CoV-2 em 2020 apresentou-se como um grande desafio para a humanidade e seus impactos se estenderam além dos sistemas de saúde. Os mercados globais sofreram com o fechamento de fronteiras, diminuição da força de trabalho e inúmeras outras barreiras que colocaram em teste a resiliência das cadeias de suprimentos. Nesse contexto, a pandemia pode ser vista com um evento disruptivo que traz consigo inúmeras incertezas e consequências em várias dimensões.

As fragilidades das cadeias de suprimentos ficaram expostas durante a pandemia, e seus efeitos foram rapidamente sentidos quando se viu o esvaziamento de prateleiras nos supermercados, em que foi presenciada a falta de itens básicos como papel higiênico, e a escassez de equipamentos de proteção individual, como máscaras, *faceshields* e álcool em gel (Hanbury 2020; Mason 2020). A dimensão completa dos impactos ainda não é precisa, e especula-se que atingiu múltiplos tipos de cadeias de suprimentos de produtos alimentícios (Akin 2020; Gallagher e Kirkland 2020), além de outras indústrias.

No que tange aos impactos sociais, a pandemia trouxe prejuízos muito além do seu efeito direto na saúde pública e seus efeitos representam um obstáculo a ser superado. Khanna (2020) chama atenção para as migrações, o desemprego e suas consequências na segurança alimentar. Além disso, o autor também chama atenção para como as implicações de uma pandemia são mais severas em populações vulneráveis, evidenciando a importância de garantir direitos alimentares e trabalhistas como uma forma de a sociedade se preparar para eventos desse tipo.

Adicionalmente, um aspecto importante a ser observado é que, apesar das pressões dos consumidores, o mercado muitas vezes falha em regular de forma eficiente os recursos disponíveis para a produção, o que Bator (1958) caracteriza como uma falha de mercado. Nesses casos, é necessário que haja intervenção para corrigir esses problemas para que o prejuízo da sociedade seja minimizado. Dessa forma, faz-se necessário que as organizações enxerguem que seus processos também geram efeitos negativos para sociedade e busquem soluções para enfrentá-los.

Exemplos de prejuízos com que a sociedade arca a partir da atividade econômica são os danos causados em bens públicos como o ar, a água e o solo. Nesses casos, o mercado tende a

ser um alocador ineficiente de recursos e muitas vezes as empresas que causam danos à sociedade não são prejudicadas financeiramente por isso. A falta de regulação e de gestão eficiente gera desequilíbrios como o observado por Delbourg e Dinar (2020), em que foi identificado que países com menor disponibilidade hídrica venderam altas quantidades de produtos cujo uso de água é intensivo para países onde a água é mais abundante, revelando uma má alocação de recursos naturais.

As consequências para a sociedade dessa desigualdade são agravadas com o crescimento populacional e as mudanças climáticas. No ano de 2016, quatro bilhões de pessoas sofriam com escassez severa de água pelo menos por um mês ao ano (Mekonnen e Hoekstra, 2016). As previsões de secas mostram que essa situação tende a se agravar, visto que as secas serão mais severas e mais frequentes em várias partes do mundo (Hasan *et al.*, 2019). Dessa forma, está evidente a necessidade de intervir nessa situação.

Para que as próximas gerações possam usufruir de uma boa qualidade de vida, é imprescindível que mudemos nossas formas de lidar com a produção, considerando questões ambientais e sociais além de somente lucro. Com vista nisso, as cadeias de suprimentos devem adotar práticas mais sustentáveis e resilientes ferramentas para a modelagem da produção, e ter atitude proativa na tomada de decisão ao englobar os impactos causados por sua atuação e os eventos disruptivos que podem afetar seu desempenho.

1.1 Justificativa

Resiliência e sustentabilidade na cadeia de suprimentos são temas de estudos recentes e têm aplicações nos mais diversos contextos. Nooraie e Parast (2015) trazem um estudo que ressalta a importância de estudar resiliência ao constatar que 60% das empresas pesquisadas reconhecem que suas cadeias de suprimentos estão sujeitas a eventos perturbadores.

Além disso, com a projeção de que em 2050 haverá uma população estimada de 9 bilhões de pessoas no mundo existe a preocupação com os níveis de produção no longo prazo, e Augustin *et al.* (2016) afirmam que apenas melhorar a produção não será suficiente, sendo imprescindível a construção de um sistema ético e sustentável. Não obstante, a humanidade ainda enfrenta o desafio de aliar a produtividade e a satisfação das necessidades materiais, com a preservação do meio ambiente.

Embora o número de artigos sobre cadeias de suprimentos sustentáveis esteja aumentando, ainda são poucos os trabalhos que integram os três aspectos da sustentabilidade (ambiental, social e econômica) para todos os participantes da cadeia. Para Gold e Schleper (2017), esse é um efeito da estratégia corporativa que busca primordialmente lucros em

detrimento das demais dimensões da sustentabilidade e que acaba tratando o pilar social insuficientemente. E ao analisar o projeto da rede da cadeia de suprimentos, Eskandarpour *et al.* (2015) afirmam que as medidas ambientais devem ir muito além da posição atual e que novas medidas sociais devem ser incluídas.

Outra lacuna na literatura foi identificada por Fahimnia e Jabbarzadeh (2016) ao destacarem que embora a incorporação de sustentabilidade e resiliência tenham sido estudadas separadamente na literatura, possivelmente devido aos desafios de gestão e modelagem associados, as discussões em torno da aplicação conjunta desses conceitos estão em estágio inicial e precisam ser exploradas.

Dessa forma, este trabalho visa contribuir para a literatura de cadeias de suprimento ao abordar as capacidades da resiliência ao mesmo tempo que incorpora os pilares social e ambiental da sustentabilidade. Para lidar com a complexidade desses temas na tomada de decisão, esta dissertação utiliza a otimização multiobjetivo para apoiar o decisor na escolha de alternativas que concilie simultaneamente os objetivos relacionados a cada conceito, considerando os investimentos em estratégias relacionadas a cada capacidade de resiliência e a incorporação do aspecto ambiental e social da sustentabilidade, com o fim de obter soluções sustentáveis e resilientes para o projeto de uma cadeia de suprimentos. E, para obter as soluções desse problema, os algoritmos genéticos foram escolhidos

Visto que os consumidores estão cada vez mais conscientes do impacto do seu estilo de vida no meio ambiente e na sociedade como um todo, além do crescente agravamento das consequências das ações humanas, faz-se necessário que as organizações estejam cientes dos efeitos negativos que podem causar e tomar decisões de acordo com o conhecimento disso. Sendo assim, a organização precisa minimizar seus impactos ambientais para manter-se competitiva numa nova conjuntura. Dessa forma, adotar uma postura proativa de mensurar os impactos e simular cenários em que recursos são escassos ou submetidos a taxação pode ser crucial para a sobrevivência da empresa.

1.2 Objetivos

Para guia a realização desta pesquisa, foram traçados os objetivos gerais e específicos apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é formular um modelo matemático que determine a Fronteira de Pareto com as soluções não-dominadas das configurações de uma rede de

distribuição em diferentes níveis de planejamento e considerando cenários disruptivos. Além disso, a modelagem deve incorporar os conceitos de resiliência e sustentabilidade de uma cadeia de suprimentos, visando atingir requisitos que atendam às demandas do mercado bem como às necessidades da sociedade como um todo.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Aplicar a abordagem de cenários disruptivos aos quais esteja sujeita a cadeia;
- Testar cenários em diferentes níveis de decisão para a partir deles escolher uma solução considerando resiliência e sustentabilidade;
- Propor medidas das capacidades da sustentabilidade e da resiliência nas cadeias de suprimentos analisadas;
- Desenvolver algoritmo genético multiobjetivo para solucionar o problema proposto.

1.2.3 Organização da dissertação

A organização desta dissertação a partir daqui se dá da seguinte maneira:

- **Capítulo 2**: a base teórica e revisão da literatura de conceitos essenciais relacionados a resiliência e sustentabilidade na cadeia de suprimentos, problemas multiobjetivo e algoritmos genéticos;
- **Capítulo 3**: apresenta a modelagem matemática proposta no trabalho e a estrutura do algoritmo genético multiobjetivo;
- **Capítulo 4**: mostra o contexto de aplicação do modelo proposto;
- **Capítulo 5**: traz os resultados da implementação do método proposto no contexto de aplicação explicado no capítulo anterior;
- **Capítulo 6:** fornece conclusões finais, destaques às contribuições do trabalho e comentários acerca de passos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As referências utilizadas para embasar e inspirar este trabalho são apresentadas e discutidas criticamente a seguir. Cada subseção deste capítulo trata de uma área relevante para a pesquisa realizada para desenvolver esta dissertação.

2.1 Resiliência na cadeia de suprimentos

Um evento disruptivo é um evento, ou um conjunto de eventos, que causa perturbação na condição normal de operação de um sistema (Francis e Bekera, 2014), levando à degradação do seu desempenho. A incerteza, inerente ao estudo de potenciais interrupções, torna importante a consideração de cenários para cobrir uma ampla gama de situações potenciais (Vugrin e Turnquist, 2012), incentivando decisões efetivas quanto à alocação de investimentos. Alguns autores sugeriram que essas interrupções raras, mas catastróficas, são diferentes das interrupções menores e frequentes e, portanto, devem ser tratadas de acordo (BRADLEY, 2012).

As cadeias de suprimento estão sujeitas a eventos disruptivos, que correspondem a problemas, ou desvios, que perturbam o funcionamento normal do sistema, levando à degradação da sua performance (Francis e Bekera, 2016). Diante da possibilidade de tais eventos, bem como as suas respectivas consequências, as ações tomadas pela empresa, como alocação de recursos e formação de estratégias, devem levar em consideração tais cenários problemáticos.

Segundo Sheffi e Rice Jr. (2005), o poder de mercado aliado à capacidade de resposta tem o potencial de criar oportunidades para solidificar uma posição de liderança. Heckmann, Comes e Nickel (2015) utilizam um exemplo de problema na cadeia de suprimentos que atingiu a Nokia e a Ericsson para ilustrar como o grau de consciência e preparação pode levar a resultados diferentes. Embora ambas as organizações tivessem que lidar com a perda de um fornecedor devido a um incêndio, a Ericsson foi bastante impactada com a perda de fornecedor, o que possivelmente causou a saída da empresa do mercado de telefonia móvel, enquanto a Nokia conseguiu adquirir fornecedores de *backup* e capacidades de produção alternativa.

Ainda de acordo com Sheffi e Rice (2005), reduzir a vulnerabilidade significa reduzir a probabilidade de uma interrupção, enquanto a resiliência se relaciona à capacidade de resposta às interrupções e pode ser alcançada criando redundância ou aumentando a flexibilidade. Exemplos de redundância são: estoque de segurança, múltiplos fornecedores e baixas taxas de

utilização da capacidade. Em contraste, a flexibilidade está relacionada às capacidades inerentes do sistema para detectar e responder rapidamente a eventos perturbadores.

Ao tratar resiliência no campo da GCS, a definição mais difundida é a de Christopher e Peck (2004), que compreende a resiliência como a habilidade de o sistema de resistir a impactos e retornar ao seu estado inicial, ou desejado. Além disso, a maioria das definições de resiliência são caracterizadas pelas capacidades de absorver, adaptar e recuperar o sistema após a influência do evento que causou danos (FRANCIS e BEKERA, 2014; VUGRIN e TURNQUIST, 2012).

A revisão apresentada em Duong e Chong (2020) analisou como colaborações podem ajudar na resposta à interrupção e recuperação das cadeias de abastecimento. Eles descobriram que a maioria dos artigos aplicou um método de modelagem matemática e, além disso, identificou a presença de categorias comuns de mecanismos colaborativos e fatores predominantes que impactam a colaboração cobrindo o compartilhamento de informações.

A melhoria da comunicação entre os participantes da cadeia de suprimentos aumenta a capacidade conjunta de absorver eventos ou mudanças repentinas. A questão do compartilhamento de informações foi abordada por Li *et al.* (2017) em um experimento de simulação realizado com uma cadeia de suprimentos de três camadas sujeita a demanda estocástica. Diferentes níveis de compartilhamento de informações entre os jogadores foram testados e políticas de estoque ideais foram adotadas por cada jogador de acordo com as informações disponíveis. Cenários em que havia compartilhamento total de informações sobre níveis de estoque e capacidade produtiva obtiveram melhores indicadores de desempenho em pedidos em carteira e custos de estoque.

A preparação para eventos adversos encarados como inevitáveis requer uma avaliação regular dos procedimentos operacionais, procedimentos de segurança, diretrizes de política, métodos de avaliação de risco e medidas defensivas, que são aspectos fundamentais da avaliação da resiliência (Ivanov *et al.*, 2016). Para agir, é interessante categorizar os tipos decisões quanto à cadeia de suprimentos que podem ser realizadas pela empresa. Segundo Diabat e Al-Salem (2015), as decisões podem ser: estratégicas, relacionadas a investimentos e de longo prazo; táticas, em que os horizontes estão entre médio e longo prazo; e operacionais: que estão relacionadas ao contexto mais corriqueiro do sistema.

2.2 Sustentabilidade na cadeia de suprimentos

Na década de 1960, tomamos conhecimento dos perigos inerentes a vários produtos químicos, incluindo aqueles usados em pesticidas, e especificamente o DDT, que foi usado por

mais de 25 anos na agricultura (D'Amato, Torres e Malm; 2002). No início da década de 1970, começou a ser conhecido o efeito que aerossóis largamente utilizados na indústria causou na camada de ozônio, removendo uma proteção crucial e afetando na saúde humana, animal e vegetal (Solomon, 1999). A partir da metade da mesma década, a chuva ácida passou a ser considerada como um problema sério e suas consequências no solo e na água vão levar muitos anos para desaparecerem (CLAIR e HINDAR, 2005).

Durante a década de 1990, vieram à tona denúncias de condições de trabalho em fábricas subcontratadas por empresas famosas na China e no Vietnã. O caso da Nike trouxe o debate sobre a responsabilidade das empresas sobre as ações de quem elas subcontratam. Inicialmente, a posição da empresa foi dizer que não eram donas das fábricas, mas apenas compradoras e que seu papel não era investigar condições de trabalho. Mas, posteriormente a Nike mudou a postura e formulou um novo código de conduta (SAGE, 1999).

Bouchery *et al.* (2017) destacam que ao longo do tempo, ficou cada vez mais clara a contribuição das emissões antropogênicas para o aumento dos níveis de gases de efeito estufa na atmosfera, com diversos efeitos no nível do mar e no clima. Uma infinidade de respostas regulatórias e voluntárias está em andamento para mitigar as mudanças climáticas, com resultados decididamente mistos até agora.

Além disso, os impactos da produção na sociedade ficaram mais claros após discussões sobre a ética por trás das operações das empresas e agora os consumidores cobram mais das empresas. Exemplos disso são os movimentos presentes atualmente que influenciam o consumo, independentemente do que seja o produto ou serviço. Podem ser citados os produtos vegetarianos, orgânicos e ainda os produtos do comércio justo, ou *Fair Trade*. O último tipo faz parte de uma iniciativa de usar o mercado para alcançar os objetivos de justiça social e ambiental, buscando escapar da lógica e de seus atores dominantes (TAYLOR, 2005).

Entretanto, não se pode dizer que não havia conhecimento prévio sobre esses problemas. Os inseticidas foram regulamentados nos EUA já em 1910 (Aspelin, 2003). O descobrimento da camada de ozônio ocorreu em 1913, e medidas de espessura bem como estudos de suas propriedades começaram a ser realizados logo em seguida e se estenderam durante as décadas subsequentes (Solomon, 1999). Os primeiros movimentos trabalhistas anti-exploração deram origem ao *Factory Act* no Reino Unido em 1833 (Nardinelli, 1980).

Com a mudança climática não é diferente. Relatos sobre a conexão entre as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono e a temperatura global foram apresentados em Arrhenius (1896), que já previa que o aumento da concentração de CO_2 levaria à subida de temperatura. A relação entre a chuva ácida e a poluição atmosférica foi descrita em 1852, o

termo “chuva ácida” foi cunhado em 1872, e outros efeitos prejudiciais da poluição já haviam sido observados previamente (Cowling, 1982).

Essas relações temporais ilustram como é difícil abordar sustentabilidade na cadeia de suprimentos. Provavelmente, pesquisas das mais distintas áreas desenvolvidas agora, já estão observando e analisando aspectos ambientais e sociais pouco comentadas no momento, mas que se transformarão em desafios a serem superados. Por não conhecermos quais serão os elementos críticos da “sustentabilidade” amanhã, rigorosamente, não podemos afirmar que existe “cadeia de suprimento sustentável” (Bouchery et al., 2017). Para ser verdadeiramente sustentável, tal cadeia teria que, ao menos, não causar danos nas dimensões sociais e ambientais, ao mesmo tempo que deve ser economicamente viável (PAGELL e SHEVCHENKO, 2014).

Dada a dificuldade de lidar no presente com desafios futuros, essa cadeia não criaria, no mínimo, nenhum dano e poderia até ter impactos positivos ou regenerativos nos sistemas sociais e ambientais, mantendo a viabilidade econômica Pagell e Wu (2009) afirmam que o conceito de sustentabilidade nas cadeias de suprimento deve ser pensado em termos de trajetórias, ao invés de estados absolutos. Para os autores, uma cadeia de suprimentos sustentável é, então, aquela que tem boa performance em medidas tradicionais de lucros e perdas e, adicionalmente, em as dimensões sociais e ambientais.

Bouchery *et al.* (2017) argumentam que mesmo a sustentabilidade sendo um alvo inalcançável em cadeias de suprimentos, vale a pena lutar constantemente para melhorar nesse quesito, e citam exemplos de empresas que fazem isso. A subsidiária operacional da Dole, Standard Fruit de Costa Rica, alinhada com a meta da Costa Rica de se tornar o primeiro país neutro em carbono até 2030, desenvolverá uma cadeia de suprimentos neutra em carbono para bananas e abacaxis da Costa Rica à América do Norte e Europa. A Finsbury Green na Austrália vende papel neutro em carbono sob sua marca FreshZero, compensando todas as emissões da cadeia de suprimentos. A Tesco trabalha para ser uma empresa de carbono zero até 2050. Aqui no Brasil, a Natura Cosméticos compensa não apenas suas próprias emissões, mas também de toda a sua cadeia de suprimentos.

Além disso, para que se conheça e desempenho de uma determinada organização em relação à sustentabilidade, é necessário medir, e a forma adequada de mensurar sustentabilidade em cadeias de suprimentos é uma discussão muito importante (Bouchery *et al.*, (2017). Gerir cadeias de suprimento de forma sustentável, tornou-se uma preocupação crescente para as empresas a fim de responder à pressão externa de governos, consumidores e organizações não governamentais (Seuring, 2013). Como consequência, mais estudos foram desenvolvidos com essa temática e buscando medidas adequadas para a sustentabilidade. Em 2013, segundo

Seuring (2013), mais de 300 artigos haviam sido publicados nos 15 anos anteriores sobre o tema *Green Supply Chain* (GSC) ou *Sustainable Supply Chain* (SSC).

O GSC pode ser alcançado por meio da incorporação de considerações ambientais ou da incorporação de logística reversa (Diabat e Al-Salem, 2015). A definição de SSC é mais abrangente, pois sua descrição, segundo Ahi e Searcy (2013), envolve a criação de cadeias de suprimento com integração voluntária de considerações econômicas, ambientais e sociais com as interações entre os participantes projetadas para gerenciar de forma eficiente e eficaz, informações e fluxos de capital associados à aquisição, produção e distribuição de produtos ou serviços. O intuito final é atender aos requisitos dos *stakeholders* e melhorar a lucratividade, competitividade e resiliência da organização no curto e longo prazo.

De acordo com Seuring e Muller (2008), a gestão sustentável da cadeia de suprimentos compete à administração de fluxos de material, informação e capital, bem como à cooperação entre todos os atores ao longo da cadeia de suprimentos em prol dos objetivos das três dimensões da sustentabilidade, que são: econômica, ambiental e social. No que se refere aos pilares da sustentabilidade, a gestão sustentável da cadeia de suprimentos é considerada como um advento de uma nova era por conseguir incorporar performance a todos os envolvidos nessa interseção (ANSARI & KANT, 2017).

Considerando impactos sociais, as condições de trabalho em uma empresa é um aspecto que deve ser abordado. Para isso, utilizar informações que já se têm pode trazer importantes contribuições para a gestão, trazendo informações relevantes sobre os riscos que estão presentes em todas as atividades de uma organização, e que podem colocar os trabalhadores em situações perigosas. Diante disso, Guimarães *et al.*(2020) utilizaram dados de acidentes de trabalho que estavam apenas armazenados como registro, para entender melhor as situações em que houve acidentes de trabalho numa empresa, obtendo informações relevantes para a tomada de decisão que visa minimizar os possíveis danos.

Entre as estruturas nesta área, Govindan, Jafarian e Nourbakhsh (2015) propuseram um modelo de design de cadeia de suprimentos que minimiza os custos e os impactos ambientais. As principais decisões neste caso são: (i) escolher fornecedores de um conjunto de fornecedores potenciais que são categorizados em alguns graus pelos formuladores de políticas de acordo com seus atributos, (ii) localização de instalações (fábricas, centros de distribuição e *crossdocks*), (iii) escolher a tecnologia de produção das fábricas, (iv) determinar a quantidade de pedidos dos fornecedores escolhidos e (v) determinar o fluxo de produtos dos fornecedores até os varejistas.

Azevedo (2013) propõe o índice "*Ecosilient*", que integra a resiliência e sustentabilidade para medir a performance das empresas e a correspondente cadeia de suprimentos nesses critérios. Zhang *et al.* (2014) propuseram uma estrutura de otimização multiobjetivo para apoiar decisões relacionadas ao planejamento, à expansão e ao *design* da cadeia de suprimentos, considerando três objetivos: custo total, emissões de gases de efeito estufa e *lead time* relacionado ao atendimento à demanda como métricas econômicas, ambientais e sociais, respectivamente.

No que tange a definições, Xie (2016) afirma não existir política ótima, que relacione os pilares da sustentabilidade, mas o criador das políticas deve realizar um *tradeoff* antes de tomar decisões sobre como se dará a cooperação entre os participantes da cadeia. Ainda de acordo com o autor, é possível ter melhora na lucratividade ao se adotar os conceitos de sustentabilidade.

Segundo Ansari e Kant (2017), apesar da existência de muitos estudos sobre sustentabilidade, eles ainda carecem de análise quantitativa nos estudos da cadeia de suprimentos e de modelagem matemática que incorpore tais conceitos em algoritmos de programação.

Mesmo com a presença de debates sobre a relevância de abordar esses temas, e apesar de facilmente se entender a importância de adotar estratégias que aumentem a resiliência e a sustentabilidade no projeto da cadeia de suprimentos, estudos que unam ambas as perspectivas ainda são difíceis de serem encontrados (MARI *et al.*, 2016).

2.3 Problemas multiobjetivo

Problemas de otimização que envolvem múltiplos critérios para comparação de alternativas viáveis, no quais há mais de uma função objetivo, são denominados de problemas de otimização multiobjetivo (Almeida *et al.*, 2015). Em problemas assim, é raro existir uma única solução ótima devido à possibilidade de que uma alternativa pode ser, simultaneamente, superior a outra em um critério e inferior em outro. No caso em que uma solução viável é melhor do que outra em todos os critérios considerados, diz-se que ela domina a outra. Consequentemente, a alternativa considerada inferior em todos os aspectos é chamada de dominada. A solução desejada para um problema de otimização multiobjetivo é um conjunto formado por soluções que não dominam umas às outras, conhecidas como soluções não dominadas.

Formalmente, de acordo com Mishra e Harit (2010), uma solução x_1 domina outra solução x_2 se as seguintes condições são verdadeiras:

- A solução $x_1$não apresenta uma performance pior do que a solução x_2 em nenhum dos M objetivos, ou seja, $f_j(x_1) \prec f_j(x_2)$ para todo $j = 1,2,\ldots,M$.
- A solução x_1é melhor do que $x_2$em pelo menos um dos M objetivos, o que quer dizer que $f_j(x_1) \succ f_j(x_2)$ para algum $j \in \{1,2 \ldots M\}$.

Em problemas assim, o que se deseja obter é a Fronteira de Pareto, que compreende ao conjunto de todas as soluções que não são dominadas por nenhuma das demais. A depender da complexidade dos problemas, pode não ser computacionalmente viável comparar todas os pares de soluções necessários para definir a Fronteira de Pareto, procedimento conhecido como Enumeração Completa. Nesse caso, o uso de heurísticas oferece bons equilíbrios entre qualidade da solução e tempo computacional, pois eles levam a boas soluções, mas possuem implementação menos custosa.

2.4 Algoritmos genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG) são um tipo de heurística baseada na Teoria da Evolução de Darwin, em que a busca por soluções mimetiza os indivíduos existentes na natureza, onde eles podem sofrer mutações, seleções e *crossover*, assim como acontece na natureza. Sob essa lógica evolucionária, a aprendizagem é viabilizada e obtida através da experiência, nas gerações seguintes. Dessa forma, novas estratégias são criadas a partir de estratégias anteriores, buscando soluções que apresentam um melhor ajuste ("*fitness*"). Definindo a função ajuste e a otimizando através dos algoritmos, a procura dentro espaço de busca tende a ser mais diversificada, e a perpetuação do genótipo dos indivíduos depende dos fenótipos de cada solução, que é o seu valor na função, levando a tendência de que os mais aptos sobrevivam (MITCHELL, 1998).

O uso de AG tem chances altas de sucesso e de superar outros métodos de otimização. Tais chances aumentam para problemas cujo espaço de buscas é extenso, não é suave nem unimodal, não é bem conhecido, ou quando a função de ajuste possui muito ruído, ou, se não há necessidade de que um máximo global seja encontrado. Como os AG são métodos de pesquisa multiponto, é possível obter solução ótima até para funções objetivo multimodais. Além disso, os AGs são aplicáveis a problemas de espaço de busca discreto. Assim, o AG não é apenas muito fácil de usar, mas também uma ferramenta de otimização muito poderosa (HALDURAI, MADHUBALA e RAJALAKSHMI, 2016).

Sob essa lógica evolucionária, a busca por soluções viáveis possui variabilidade, devido a mutações. Além disso, para que o algoritmo tenda a convergir para um valor próximo do ótimo, a ocorrência de seleções e *crossover* leva à sobrevivência dos indivíduos que apresentem

os melhores valores e à exploração do espaço próximo. A vantagem desse método sobre as demais heurísticas reside no balanço apresentado entre a convergência e a diversidade de exploração dos locais de busca (ALTIPARMAK *et al,* 2009).

Pelo fato de os AGs não serem limitados por suposições restritivas sobre o espaço de busca, como relativas à continuidade, à existência de derivadas, à unimodalidade, entre outros, eles vêm sendo aplicados a círculos de negócios, científicos e de engenharia (Goldberg, 1989). As razões por trás do número crescente de aplicações são claras. Esses algoritmos são computacionalmente simples, mas poderosos em sua busca por melhorias.

A abordagem matemática, utilizando algoritmos genéticos na cadeia de suprimentos, já é bastante utilizada, e está presente em muitos contextos, como no projeto de uma indústria de plásticos na Turquia desenvolvido no trabalho de Altiparmak *et al*. (2006), na alocação e roteirização de entregas *last mile* trazido por Zhou *et al*. (2017), e no sequenciamento considerando múltiplos produtos e compartilhamento de recursos estudado por Liu *et al*. (2017).

2.4.1 Algoritmos genéticos multiobjetivo

As fontes de complexidade para problemas de otimização multiobjetivo correspondem à: amplitude do espaço de busca, presença de diferentes tipos de dados e complexidade computacional das funções objetivo (Saeidian, Mesgari, e Ghodousi, 2016). Resolver tais problemas usando procedimentos exaustivos pode dedicar muito tempo e esforço computacional, de modo que os métodos heurísticos possam superar tais complicações e encontrar possíveis soluções perto o bastante do ideal, em tempo razoável.

Como forma de encontrar soluções para problemas com múltiplos objetivos, de acordo com Coello (2000), o conceito de algoritmos genéticos, que já era usado em aplicações com apenas um objetivo desde a década de 1970, começou a ser explorado duas décadas depois. A partir desses estudos, foi possível chegar ao uso desse método de forma a considerar diferentes objetivos separadamente, não exigindo quaisquer transformações dos múltiplos objetivos em uma função única. Além disso, como os AGs lidam simultaneamente com muitas soluções potenciais, são especialmente adequados para analisar múltiplos objetivos. No entanto, pelo fato do ser um método probabilístico, a solução ótima não é garantida e, assim, a saída fornecida por esses métodos é a Fronteira de Pareto contendo soluções ótimas não dominadas (LINS e DROGUETT, 2011).

Os AGs são concebidos como uma analogia da evolução na natureza, onde cada cromossomos, ou indivíduo, representa uma possível solução para o problema analisado. Os cromossomos, por sua vez, são formados por genes, que representam as variáveis do problema

modelado. O termo “população” refere-se ao conjunto formado pelas soluções consideradas. A cada indivíduo atribui-se um valor de avaliação: sua aptidão, que indica quão boa é a respectiva solução em relação às outras soluções da população. Os indivíduos são submetidos a um processo evolucionário que consiste basicamente em: avaliação, seleção, recombinação (*crossover*) e mutação.

O processo se inicia com a criação aleatória dos indivíduos que comporão a população inicial. A partir de um processo de seleção baseado no desempenho de cada indivíduo, exemplares são escolhidos para a fase de reprodução, que cria soluções por meio de um conjunto de operadores genéticos. Assim, quanto mais apto o indivíduo, maior sua chance de sobrevivência, o que significa fazer parte das gerações seguintes. Além disso, os indivíduos mais adaptados têm mais chances de se gerarem “filhos”, o que acontece através de cruzamentos com outros indivíduos da população, produzindo descendentes a partir de genes oriundos de ambas as partes.

A mutação, que corresponde à alteração de determinados genes do cromossomo, tem um papel significativo, ao introduzir na população novos indivíduos gerados de maneira aleatória, possibilitando que outras partes do espaço de solução possam ser exploradas. Dessa forma, é obtida maior variabilidade do espaço de busca, permitindo que valores com melhor “*fitness*” localizados distantes no espaço de busca possam ser alcançados.

Ao fim de vários ciclos evolucionários, a população resultante deverá conter indivíduos mais aptos. Para determinar o final do processo, pode-se fixar o número de gerações, o tamanho da população, ou ainda introduzir condições de parada para o algoritmo ao alcançar uma solução satisfatória, isto é, quando atingir um ponto ótimo. Outros critérios que podem ser utilizados para a parada, incluindo o tempo de processamento, de convergência e o grau de similaridade entre os elementos numa população (MITCHELL, 1998).

Para modelagem do algoritmo genético de um problema, a representação é um aspecto imprescindível. A representação estabelece a estrutura, formada por genes, do cromossomo, e a partir disso o espaço de busca do problema é formulado. Essas representações podem ser de vários tipos como binária, real, inteira, grupamento de inteiros e baseadas em ordem.

A solução de um problema é representada por um conjunto de valores para as variáveis, ou genes, que unidos compõem uma cadeia de valores, o cromossomo. Essa representação é denominada codificação, e é composta por uma sequência formada por símbolos de um sistema alfabético. Os primeiros AGs empregavam o alfabeto binário, porém, com o passar do tempo surgiram AGs que codificam as soluções com outros sistemas, como os números reais

(Michalevicz, 1996). O procedimento de decodificação do cromossomo consiste basicamente na construção da solução real do problema, a partir do cromossomo, para que esta seja avaliada.

A etapa de avaliação do AG tem o papel de examinar quão próxima está a obtenção da solução ótima do problema. Ela ocorre por meio de uma função que melhor simboliza o problema e visa fornecer uma medida de aptidão, ou *fitness*, dos indivíduos na população que conduzirá a busca. Para cada solução, a função de avaliação consiste em se atribuir um valor numérico para a aptidão do indivíduo representado em solucionar o problema em questão.

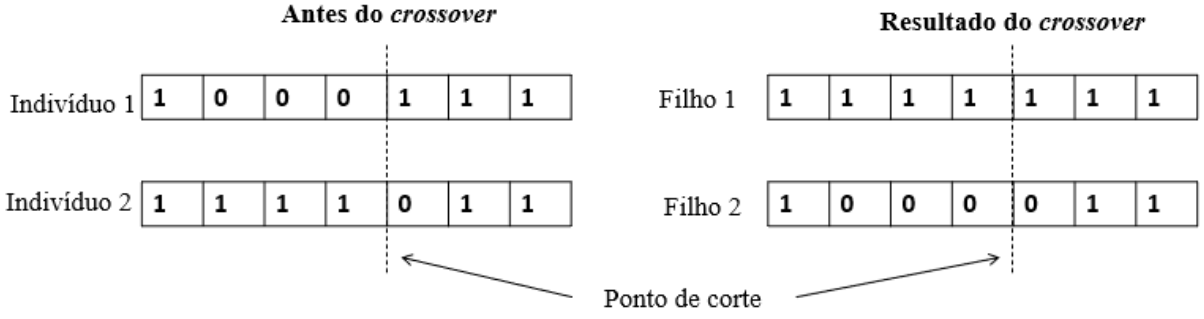
2.4.2 Operadores genéticos

No que tange os operadores genéticos, de acordo com Goldberg (1989), os mais difundidos no caso dos algoritmos genéticos são reprodução, cruzamento e mutação.

A reprodução compreende ao processo de eleger, de acordo com sua aptidão, e fazer uma cópia de um determinado cromossomo para compor a próxima população. Assim, os cromossomos mais aptos contam com mais chances de serem "pais", ou seja, passar seus genes para indivíduos da população seguinte. Os métodos de realização são muitos, dentre eles a substituição de toda população, troca de toda população com elitismo, em que todos os cromossomos são substituídos, e apenas o cromossomo mais apto da população comporá a população seguinte, e troca parcial da população, onde os K melhores indivíduos da população corrente são copiados para população seguinte (Goldberg, 1989; Michalevicz, 2013).

O cruzamento, ou *crossover*, é um operador que consiste no intercâmbio de genes dos cromossomos (pais), formando-se duas novas soluções (filhos). Este processo viabiliza a evolução através da mistura de características de dois indivíduos, o cruzamento consiste em utilizar partes do material genético de um cromossomo acrescida de genes de outro. A Figura 1 a seguir ilustra como o cruzamento funciona:

Figura 1 - Procedimento de crossover



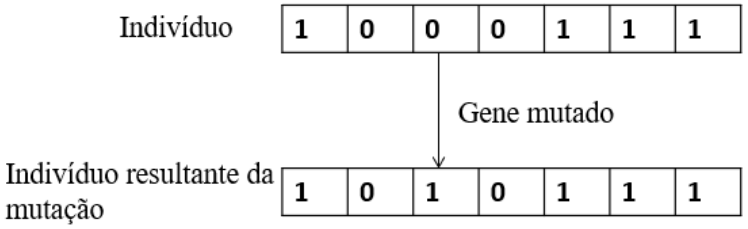
Fonte: a autora, 2021

O ponto de corte do cruzamento pode ser escolhido aleatoriamente, ou de acordo com regras de viabilidade. No exemplo da Figura 1 ocorreu com apenas um ponto, mas pode haver

mais cortes, caracterizando o *multi-point crossover* (Goldberg, 1989; Holland, 1992). Para obter o *crossover*, primeiramente se realiza a escolha dos cromossomos "pais". Em seguida, o procedimento de cruzamento acontecerá, ou não, de acordo com o parâmetro de taxa de cruzamento. Assim, a taxa de cruzamento determina a proporção de cromossomos "pais" que são repassados integralmente geração seguinte, gerando "filhos" idênticos a eles.

A mutação é caracterizada pela alteração aleatória, com baixa probabilidade, do valor contido nos genes de um indivíduo por outro valor válido. No exemplo binário apresentado, é trocado 0 pelo 1, e vice-versa, como na Figura 2. Similarmente ao cruzamento, utiliza-se uma taxa de mutação, e para cada elemento do conjunto de caracteres, é sorteada a ocorrência ou não de mutação; no caso que ocorre, o elemento é trocado por outro valor válido do alfabeto.

Figura 2 - Processo de mutação



Fonte: a autora, 2021

2.4.3 Parâmetros Evolutivos

Os parâmetros que mais exercem influência no desempenho do algoritmo genético são: tamanho da população, taxa de cruzamento, taxa de mutação de número de gerações.

A escolha do tamanho da população é decisiva para o desempenho global e a eficiência dos Algoritmos Genéticos. Se a população for muito pequena, a cobertura do domínio ficará a desejar, ocasionando um pior desempenho. Já uma população suficientemente grande proporciona melhor cobertura do espaço de busca do problema analisado, evitando a convergência prematura em ótimos locais. Contudo, uma população demasiadamente grande requer recursos computacionais mais robustos, ou um tempo maior de processamento do problema. Sendo assim, a busca de um ponto de equilíbrio do tamanho escolhido para a população é crucial para o desempenho do algoritmo (GOLDBERG, 1989).

A taxa de cruzamento compreende à probabilidade de um indivíduo sofrer *crossover*. Quanto maior o valor a ela atribuído, mais rápido será a entrada de novos indivíduos na população. No entanto, há um risco de substituir rapidamente os integrantes da população, pois uma substituição elevada pode causar perda de variedade genética, ao se trocar estruturas de

alta aptidão e convergência por uma população com indivíduos muito semelhantes, que podem até ser soluções piores (Goldberg, 1989). Mas, com um valor muito baixo o algoritmo pode demorar para encontrar uma resposta admissível.

A taxa de mutação determina com que probabilidade um gene componente do cromossomo será alterado. Esse valor previne que a população seja atraída e fique presa em ótimos locais, além de viabilizar uma melhor exploração do espaço de busca. Entretanto, deve-se ter cautela ao escolher uma taxa de mutação mais alta, pois a convergência para uma solução ótima pode ser prejudicada pela alta aleatoriedade imposta (GOLDBERG, 1989).

Por fim, o número de gerações representa a quantidade de ciclos evolutivos do Algoritmo Genético, além de ser uma das condições de parada. Se esse valor for demasiadamente baixo, um desempenho pior pode ser observado. Já um número grande faz necessário um tempo maior de processamento, mas, em contrapartida, uma melhor cobertura do domínio do problema é fornecida ao se evitar a convergência em ótimos locais (MICHALEWICZ, 2013).

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

A seguir, a metodologia empregada neste trabalho é apresentada, e nas seções seguintes as informações relevantes para a concepção da modelagem proposta são discutidas.

3.1 Metodologia

De acordo com Fontelles *et al.* (2009), a presente pesquisa é de natureza quantitativa e, quanto à finalidade, caracteriza-se como aplicada, pois busca trazer uma alternativa de solução para problemas práticos. Quanto aos objetivos, ela é classificada como exploratória, dado que estudar e relacionar os fenômenos do problema em questão. No que tange aos procedimentos técnicos, o trabalho a ser desenvolvido é uma pesquisa documental.

O presente trabalho busca modelar uma cadeia de suprimentos desde os fornecedores até o cliente final, e a partir de análises de cenários, entender como o sistema se comporta de acordo com os critérios de resiliência e sustentabilidade. O modelo em questão abrange os fatores a seguir: (i) investimento na resiliência do sistema; (ii) o nível de serviço oferecido (iii) impactos financeiros dos eventos disruptivos; (iv) impacto ambiental gerado pelo funcionamento da cadeia de suprimentos; (v) o impacto social causado pelo empreendimento.

A avaliação do investimento esperado nos impactos do projeto do sistema de cenários disruptivos em uma cadeia de suprimentos visa estabelecer uma estratégia baseada na resiliência que determina o projeto ideal e a alocação de recursos financeiros. Essa estratégia pode evitar ou pelo menos reduzir os impactos negativos no desempenho da rede devido a interrupções, considerando um conjunto de opções de investimento para melhoria da resiliência. Diante de problemas complexos, a abordagem multiobjetivo é uma forma interessante de abordar várias dimensões simultaneamente. Lucas *et al.* (2020) apresentaram uma abordagem multiobjetivo para um problema de roteirização de minério de ferro ao considerar os objetivos custos e tempo em vários cenários em que havia interrupções nos caminhos possíveis de entrega da mercadoria.

Assim, (i) inclui o investimento de decisões pré-evento que são definidas em duas etapas, que correspondem: primeiro, à definição da configuração da cadeia de suprimento, ou seja, seleção de fornecedores e instalações; e, em segundo lugar, os investimentos na melhoria da resiliência, que podem ser realizados com a inclusão das capacidades de absorção, adaptativa e restauradora (Vugrin e Turnquist, 2012; Francis e Bekera, 2014; Levalle e Nof, 2015) para a configuração da cadeia de suprimento selecionada. As ações pós-evento incluem os esforços para restaurar a capacidade da rede no número de períodos estabelecido. O segundo fator (ii)

inclui o custo esperado do impacto de cenários disruptivos na rede de ações e pós-evento no atendimento à demanda.

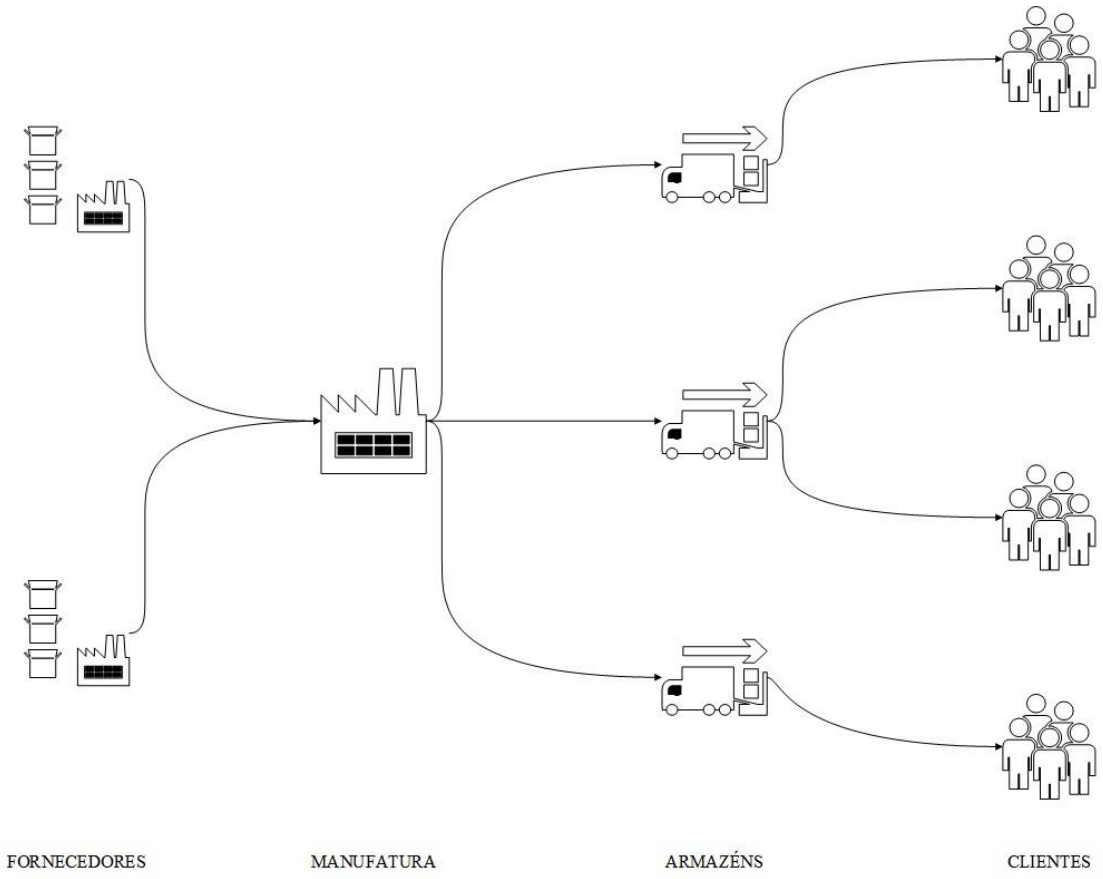
Além disso, a perspectiva da sustentabilidade é abordada em (iii), (iv) e (v), seguindo a definição de sustentabilidade do *triple bottom line* (Devika, Jafarian e Nourbakhsh, 2014). O pilar correspondente à sustentabilidade econômica (iii) do o modelo avalia como a solução proposta é lucrativa, considerando o preço de venda dos produtos, bem como os custos fixos e variáveis de mão de obra, compra, processamento e transporte.

O impacto ambiental (iv) da cadeia de abastecimento através da emissão de CO_2 gerado pelo transporte, processo de fabricação, abertura de instalações e a pegada de carbono (*footprint*) de matérias-primas, a fim de propor uma estratégia de base ambiental para a cadeia de abastecimento projeto e operação. Por conveniência, apenas as emissões de CO_2 são consideradas como influência ambiental, que é um índice ambiental muito popular e simples de ser obtido (BOUCHERY *et al.*, 2017).

Por fim, o pilar social que muitas vezes é negligenciado (Gold e Schleper, 2017) corresponde a (v). Para mensurar esse aspecto, foram considerados os empregos gerados por cada decisão (Miret *et al.*, 2015; Martire, 2015; Osmani e Zhang, 2017) e o papel dos consumidores é abordado pelos níveis de serviço ao cliente, diferentemente de Türkay, Saraçoğlu e Arslan (2016). Além disso, o indicador socioeconômico do PIB industrial é considerado para que regiões que são industrialmente menos desenvolvidas sejam priorizadas.

Uma cadeia de suprimentos é composta por diversos atores e, neste trabalho, serão considerados fornecedores (S), manufaturas (M), distribuidores (W) e clientes (C). O modelo suporta o estudo dos fluxos sujeitos a vários cenários de falhas, que levam à sua inviabilidade, e considerando estratégias para recuperar-se das disrupções. A Figura 3 ilustra um exemplo de cadeia de suprimentos, em que as setas representam os fluxos entre as instalações dos seus diferentes atores.

Figura 3 - Exemplo de cadeia de suprimento



Fonte: a autora, 2021

Os algoritmos construídos para esse trabalho foram escritos na linguagem de programação R. Para avaliar o desempenho em resiliência e sustentabilidade das configurações de cadeias geradas pelo algoritmo, serão avaliadas as funções presentes nas seções a seguir.

3.2 Premissas do modelo

- As demandas dos clientes são conhecidas e constantes ao longo do tempo;
- Um único tipo de fluxo de material entre os nós;
- As instalações não podem pedir mais do que o necessário para entregar os pedidos recebidos, o que significa que o armazenamento não é permitido;
- O número e as localizações potenciais das instalações (ou seja, manufaturas e armazéns) são pré-definidos;
- Não há fluxo entre as instalações do mesmo nível. Por exemplo, não há transporte entre armazéns;
- Fornecedores, manufaturas e armazéns têm capacidade limitada;

- As manufaturas não podem enviar produtos diretamente aos clientes, apenas os armazéns podem;
- Eventos disruptivos só afetam manufaturas e armazéns, reduzindo temporariamente sua capacidade;
- A recuperação da capacidade de instalação utiliza uma parte do recurso de recuperação adquirido anteriormente;
- No início de cada período, o valor total do recurso de recuperação está sempre **disponível.**

3.3 Variáveis e parâmetros do modelo

As notações empregadas estão apresentadas para os conjuntos, as variáveis e os parâmetros do modelo estão presentes nas Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente.

Tabela 1 - Conjuntos da modelagem proposta

Conjuntos	Descrição	Conjuntos	Descrição
S	Conjunto dos fornecedores s	C	Conjunto dos Clientes
M	Conjunto das plantas de manufatura	Z	Conjunto das zonas onde as instalações estão localizadas
M'	Conjunto das plantas de manufatura existentes	F_z	Conjunto dos fornecedores, manufaturas e armazéns na zona z
M''	Conjunto das plantas de manufatura em potencial	C_z	Conjunto dos clientes localizadas na zona z
W	Conjunto dos armazéns	Θ	Conjunto dos cenários de disrupção θ
W'	Conjunto dos armazéns existentes	PR_i	Conjunto das instalações de níveis anteriores à instalação i
W''	Conjunto dos armazéns em potencial	SU_i	Conjunto das instalações de níveis posteriores à instalação i

Fonte: a autora, 2021

Tabela 2 - Variáveis de decisão da modelagem proposta

Variável	Descrição
of_i	1 se a instalação está aberta e 0 caso contrário
ak_i	Capacidade inicial da instalação i
ra	Recurso de recuperação adicional inicial
l_j	Nível de serviço (proporção da demanda) proporcionado ao cliente j
sf_{ij}	Fluxo de produtos de i para j no cenário 0 (em que não há disrupção)
${f_{ijt}}^{\theta}$	Fluxo de produtos de i para j no $t^{\text{ésimo}}$ período de recuperação do cenário θ
${r_{it}}^{\theta}$	Capacidade da instalação i que foi recuperada no $t^{\text{ésimo}}$ período de recuperação do cenário θ (Taxa de Recuperação)

Fonte: a autora, 2021

Tabela 3 - Parâmetros da modelagem proposta

Parâmetro	Descrição	Parâmetro	Descrição
VNF_i	Investimento para abrir a instalação i com o mínimo de capacidade projetada	VAK_i	Investimento para aumentar a capacidade da instalação i em uma unidade
CR	Custo de usar uma unidade de recurso de recuperação	CMR	Custo de manter uma unidade de recurso de recuperação
VAR	Investimento para adquirir uma unidade de recurso de recuperação	RR_i	Recursos necessários para recuperar uma unidade da capacidade da instalação i
P_0	Probabilidade do evento 0 (não há disrupção)	EM_i	Emissão de carbono unitária para cada produto processado na instalação i
P_θ	Probabilidade do cenário θ (há disrupções)	LJR_i	Mão de obra local necessária para processar uma unidade na instalação i
D_j	Demanda total do cliente j por período	EF_k	Pegada de carbono (*carbon footprints*) de cada unidade adquirida do fornecedor k
LI_j	Nível mínimo de serviço que deve ser ofertado ao cliente j	ET_{ij}	Emissão de carbono unitária da transporte de i para j
T	Número total de períodos considerados	UR_z	Taxa de desemprego na região z
CF_i	Custo fixo de operação da instalação i	$GDPI_z$	Produto Interno Bruto industrial da região z
CP_s	Custo unitário de adquirir matéria-prima do fornecedor s	Υ_z	Produto Interno Bruto a zona z que o cliente está localizado
CM_s	Custo unitário de processar a matéria-prima adquirida do fornecedor s	Γ_i^θ	Impacto (%) na capacidade da instalação i no cenário θ
CT_{ij}	Custo unitário de transporte de i para j	IK_i	Capacidade inicial na instalação i
G	Um número muito grande	Π_j	Preço unitário de venda do produto para o cliente j
IR	Recursos de recuperação iniciais disponíveis	Pen_j	Penalidade unitária por não alcançar o nível de demanda do cliente j

Fonte: a autora, 2021

3.4 Função investimento

Diferentemente de como Vurgrin e Turnquist (2012) e Mari et al. (2016) abordam custos, este modelo separa os investimentos diretamente ligados com as capacidades da resiliência dos custos de operação da rede de suprimentos.

Nesta parte, o investimento em resiliência é calculado, como pode se ver na equação (4.1). Isso é feito adicionando os custos de construção de instalações (VNF_i), custos de expansão (VAK_i) e custos de recuperação (VAR). Tais investimentos estão, respectivamente, relacionados às capacidades de absorção, adaptação e recuperação.

$$F1 = \sum_{i \in \{M" \cup W"\}} VNF_i \times of_i + \sum_{i \in \{M \cup W\}} VAK_i \times ak_i + VAR \times ar \tag{4.1}$$

Onde as variáveis de decisão envolvidas são:

- ak_i: Capacidade adicional
- ar: Recursos adicionais
- of_i: Indica se a instalação i será construída

E os parâmetros apresentados são:

- VNF_i: Valor do investimento para construir a instalação i
- VAK_i: Valor do investimento para aumentar a capacidade da instalação i
- VAR: Valor do investimento para adquirir uma unidade de recurso de recuperação

A decisão de expandir instalações é definida para as já existentes e para as novas ($M \cup W$). No caso das previamente existentes, é decidido o quanto de capacidade é necessária para melhorar a habilidade da rede de absorver os efeitos de evento disruptivo. Para as novas, $i \in \{M" \cup W"\}$, o parâmetro (IK_i) estabelece o mínimo de capacidade que a instalação i deve ter, e VAK_i representa o custo de aumentar uma unidade de capacidade em qualquer instalação. Dessa forma, esse modelo é capaz de decidir o arranjo tanto de redes já existentes como das que ainda estão na fase de projeto.

3.5 Função resiliência

Quando se trata de cadeias de suprimentos, o nível de serviço é a métrica de desempenho mais utilizada, pois ela representa como o sistema se comportou na ocorrência de perturbações (Vugrin e Turnquist, 2012). A métrica de resiliência aqui proposta tem como objetivo maximizar a resiliência da cadeia de suprimentos, considerando o nível de serviço prestado aos clientes. A Equação 4.2 representa o nível de serviço prestado aos clientes. Apesar de que a maioria dos trabalhos utiliza apenas o impacto financeiro da resiliência, neste trabalho as consequências financeiras das estratégias de resiliência são medidas nos objetivos de

investimento e de custo. Sendo assim, o desempenho dos investimentos de resiliência medidos em $(F1)$ são refletidos na medida de $(F2)$.

A partir dessa função, é possível mensurar o resultado das decisões tomadas em relação às estratégias de absorver, adaptar e recuperar as capacidades do sistema analisado. Por essa equação, o impacto sentido pelos clientes é medido e quanto menor a diferença entre a demanda do mercado e a demanda atendida, mais resiliente o sistema.

Na Equação (4.2), a resiliência é medida considerando a probabilidade de cenários disruptivos (P_θ) multiplicada pela soma da diferença entre o nível de serviço ótimo (l_j) e a demanda atendida $({f_{ijn}}^\theta)$ em cada cenário perturbador θ.

$$F2 = \sum_{\theta} P_\theta \left[\sum_{j \in C} \sum_{t=1}^{T} \left(l_j - \sum_{i \in W} {f_{ijt}}^\theta \right) \right] \tag{4.2}$$

Cujas variáveis de decisão apresentadas são:

- ${f_{ijt}}^\theta$: Fluxo da instalação i para a j, no período t de recuperação do evento θ
- l_j: Nível de serviço para o cliente j

E o parâmetro envolvido é:

- P_θ : Probabilidade de ocorrer o evento catastrófico θ

3.6 Função lucro

A equação (4.3) representa a taxa média de custo de operação da cadeia de suprimentos, e é composta pelos termos C_0 e $C_\theta(n)$, que representam respectivamente os custos de operação normais e em períodos disruptivos, e estão presentes nas equações (4.3.1) e (4.3.2).

$$F3 = P_0(R_0 - C_0) + \sum_{\theta \in \Theta} P_\theta \left(\frac{R_\theta(T) - C_\theta(T)}{T} \right) - \sum_{i \in \{M \cup W\}} CF_i of_i - CMR(IR + ar) \tag{4.3}$$

Onde se têm como parâmetros:

- P_0: Probabilidade de não ocorrer nenhum evento catastrófico
- N: Número máximo de períodos para se recuperar após a ocorrência do evento

A primeira parte da equação (4.3) é obtida multiplicando a probabilidade de ocorrência de um cenário normal (P_0) com a diferença entre a receita gerada (R_0) e os custos envolvidos (C_0). A receita é obtida a partir do somatório da multiplicação do preço de venda pela demanda atendida, como é calculado na equação (4.3.1). Já a forma de mensurar os custos é representada pela equação (4.3.2) e compreende no somatório dos custos de compra, fabricação, transporte e manuseio, respectivamente, envolvidos no fluxo.

$$R_0 = \sum_{j \in C} \Pi_j l_j \tag{4.3.1}$$

Onde se vê:

- Π_j: Parâmetro do preço unitário de venda para o cliente j
- l_j: Variável de decisão da quantidade de produtos fornecida para o cliente j

A equação que abrange os custos envolvidos na operação da cadeia em períodos em que não há disrupções (C_0) corresponde à Equação (4.3.2).

$$C_0 = \sum_{i \in S} \sum_{j \in M} CP_i sf_{ij} + \sum_{i \in M} \sum_{j \in W} CM_i sf_{ij} + \sum_{i \in \{S \cup M \cup W\}} \sum_{j \in SU_i} CT_{ij} sf_{ij} \tag{4.3.2}$$

Na equação (4.3.2), a variável de decisão envolvida é:

- sf_{ij}: Fluxo de peças da instalação i para a instalação j em um período normal

E os parâmetros presentes em (4.3.2) são:

- CM_i: Custo unitário de manufatura na instalação i
- CP_i: Custo unitário de compra de insumos da instalação i
- CT_{ij}: Custo unitário de transporte da instalação i para a instalação j

A última parte é uma soma onde cada parcela consiste no custo esperado para o evento θ, representado por $C_\theta(n)$, que está apresentado na equação (4.3.2), multiplicado pela sua probabilidade de ocorrência e dividido pelo número de períodos de recuperação mais um $(T + 1)$. $C_\theta(n)$ é semelhante a (C_0), mas também conta com outros custos, como a penalização por demanda não atendida e os períodos de recuperação.

$$R_\theta(T) = \sum_{j \in C} \Pi_j \sum_{i \in W} \sum_{t=1}^{T} {f_{ijt}}^\theta \tag{4.3.3}$$

Onde aparece mais uma vez o parâmetro Π_j referente ao preço unitário de venda para o cliente j e a seguinte variável de decisão:

- ${f_{ijt}}^{\theta}$: Variável de decisão do fluxo de produtos fornecido da instalação i para a instalação j no t-ésimo período de recuperação do evento θ

$$C_{\theta}(T) = \sum_{i\in S}\sum_{j\in M}\sum_{t=1}^{T} CP_i {f_{ijt}}^{\theta} + \sum_{i\in M}\sum_{j\in W}\sum_{t=1}^{T} CM_i {f_{ijt}}^{\theta} + \sum_{i\in\{S\cup M\cup W\}}\sum_{j\in SU_i}\sum_{t=1}^{T} CT_{ij} {f_{ijt}}^{\theta} + \sum_{j\in C} Pen_j\left(l_j - \sum_{i\in W}\sum_{t=1}^{T} {f_{ijt}}^{\theta}\right) + \sum_{i\in\{M\cup W\}}\sum_{t=1}^{T} RR_i {CRr_{it}}^{\theta} \quad (4.3.4)$$

Onde estão presentes as variáveis de decisão já explicada ${f_{ijt}}^{\theta}$ referente ao fluxo de peças entre instalações e:

- ${r_{it}}^{\theta}$: Quantidade de recursos de recuperação na instalação i no n-ésimo período de recuperação do evento θ

E os parâmetros que fazem parte da equação (4.3.2) já foram explicados na explanação da equação (4.3.2) e os seguintes parâmetros:

- Pen_j: Custo de penalização por não suprir a demanda prometida ao cliente j
- RR_i: Custo unitário para recuperar uma unidade da capacidade da instalação i

3.7 Função impacto ambiental

Para mensurar os impactos da cadeia no meio ambiente, tanto para o projeto quanto para a operação da rede, o modelo avalia a emissão de CO_2 em todas as cadeias de suprimentos. Por conveniência, as emissões de CO_2 serão consideradas como a única influência ambiental, uma vez que é um índice ambiental muito utilizado e difundido na literatura, além de facilmente medido (WANG *et al.*, 2011).

A equação (4.4) mede o impacto ambiental por meio da taxa de emissão de dióxido de carbono da pegada (*footprint*) deixada na produção de matéria-prima (EF_{ij}), da fabricação (EM_i), e do transporte entre instalações (ET_{ij}). Esta análise é feita para os cenários normais e para os interrompidos, que são EI_0 e $EI_{\theta}(T)$ e estão representados nas equações (4.4.1) e (4.4.2), respectivamente. Por fim, cada impacto é somado na equação (4.4). Dessa forma, são medidos os impactos pré e pós eventos disruptivos.

$$F4 = P_0 \times EI_0 + \sum_{\theta} P_{\theta} \times \frac{EI_{\theta}(T)}{T} \quad (4.4)$$

Onde os parâmetros envolvidos são:

- P_θ : Probabilidade de ocorrer o evento catastrófico θ
- P_0: Probabilidade de não ocorrer nenhum evento catastrófico
- N: Número máximo de períodos para se recuperar após a ocorrência do evento

Já a equação (4.4.1) que mede as emissões de dióxido de carbono geradas nas operações da cadeia de suprimentos é dada por:

$$EI_0 = \sum_{i \in S} \sum_{j \in M} EF_i \times sf_{ij} + \sum_{i \in M} \sum_{j \in W} EM_i \times sf_{ij} + \sum_{i \in \{S \cup M \cup W\}} \sum_{j \in SU_i} ET_{ij} \times sf_{ij} \qquad (4.4.1)$$

Na equação (4.4.1), tem-se a variável de decisão:

- sf_{ij}: Fluxo de peças da instalação i para a instalação j em um período normal

E os parâmetros envolvidos são:

- EF_i: Emissão de CO_2 para produzir uma unidade de insumo do fornecedor i *(footprint)*
- EM_i: Emissão de CO_2 na etapa de manufatura do produto na instalação i
- ET_{ij}: Emissão de CO_2 por unidade transportada da instalação i para a instalação j

A equação (4.4.2) apresenta os mesmos parâmetros que a equação (4.4.1) apresentada anteriormente, porém a variável de decisão é o fluxo entre instalações em períodos de recuperação ${f_{ijn}}^\theta$, já apresentada na equação (4.3.2).

$$EI_\theta(T) = \sum_{i \in S} \sum_{j \in M} \sum_{t=1}^{T} EF_i \times {f_{ijt}}^\theta + \sum_{i \in M} \sum_{j \in W} \sum_{t=1}^{T} EM_i \times {f_{ijt}}^\theta + \sum_{i \in \{S \cup M \cup W\}} \sum_{j \in SU_i} \sum_{t=1}^{T} ET_{ij} \times {f_{ijt}}^\theta \qquad (4.4.2)$$

3.8 Função impacto social

O modelo proposto de avaliação de impacto social presente na equação (4.5) visa priorizar regiões menos desenvolvidas na localização de instalações, especialmente aquelas com maior taxa de desemprego e menor participação do segundo setor econômico no Produto Interno Bruto. A função social avalia a proporção de empregos locais criados (LJ_z), as porções da atividade econômica industrial local (LA_z), e o nível de oferta de demanda local (LD_z). Essas parcelas são ponderadas por índices locais, que representam a taxa de desemprego (UR_z), e a participação do setor econômico no Produto Interno Bruto ($GDPI_z$ e Y_z), dando preferência às zonas menos desenvolvidas. Essa abordagem de utilizar os níveis de atendimento ao cliente de

uma perspectiva social é destacada por Türkay *et al.* (2016), de onde surgiu a ideia por trás da incorporação do indicador PIB industrial.

$$F5 = \sum_{z \in Z} [UR_z \times LJ_z + (1 - GDPI_z) \times LA_z + (1 - Y_z) \times LD_z] \tag{4.5}$$

A equação (4.5) é composta por medidas mais complexas, (LJ_z), (LA_z) e (LD_z), que serão explicadas mais à frente e pelos seguintes parâmetros:

- UR_z: Taxa de desemprego na zona z
- $GDPI_z$: Porcentagem do PIB da zona z que corresponde a atividade industrial
- Y_z: PIB da região z na qual o cliente está localizado

A abordagem para medir o impacto social da operação da cadeia de suprimentos segue duas subcategorias sociais da *Global Reporting Initiative* (GRI), ou seja, as Práticas Trabalhistas e o Trabalho Decente, onde são descritos os critérios relativos às taxas de emprego, e a Sociedade, onde são contabilizados os impactos negativos do desemprego, o desempenho econômico comunitário e o nível de serviço disponível à comunidade. Além disso, trabalhos sobre operação de cadeias de suprimentos como Martire *et al.* (2015) e utilizam a empregabilidade como medida de impacto social, e Miret *et al.* (2016) utilizam empregos locais gerados na modelagem.

A empregabilidade é considerada na primeira parte da equação, onde a taxa de desemprego regional está multiplicando a proporção de possíveis empregos locais criados (LJ_z) calculados na equação (4.5.1), incluindo as etapas de manufatura, armazenamento e transporte para os clientes, em circunstâncias normais, representados pela probabilidade de ocorrência de cenário normal. Todos os parâmetros mencionados são multiplicados pela variável de fluxo normal sf_{ij}.

$$LJ_z = \frac{\sum_{i \in F_z} \sum_{j \in SU_i} LJR_i \times sf_{ij}}{\sum_{i \in \{S \cup M \cup W\}} \sum_{j \in SU_i} LJR_i \times sf_{ij}} \tag{4.5.1}$$

A variável de decisão sf_{ij} já é conhecida, que corresponde ao fluxo entre instalações em períodos normais, e o parâmetro presente é:

- LJR_i: Mão de obra requerida pela instalação i

Considerando a participação industrial do Produto Interno Bruto, a segunda parte da equação utiliza a parcela do PIB composta pelo setor industrial. No modelo, utilizou-se $(\mathbf{1} - \boldsymbol{GDPI_z})$ para acentuar regiões menos desenvolvidas presentes no conjunto z, onde a construção de uma nova instalação traria mais benefícios e relacionou com a proporção do fluxo da zona em questão sobre o total, que é LA_z apresentado na equação (4.5.2).

$$LA_z = \frac{\sum_{i \in F_z} \sum_{j \in SU_i} sf_{ij}}{\sum_{i \in \{S \cup M \cup W\}} \sum_{j \in SU_i} sf_{ij}} \tag{4.5.2}$$

Onde a variável de decisão sf_{ij} é somada na parte de cima da equação para o fluxo dentro da zona e na parte de baixo, para todo o sistema.

A última soma na equação (4.5) está relacionada ao nível de serviço oferecido, que também é considerado um impacto na sociedade devido ao preenchimento de necessidades e é calculado adicionando o nível de serviço ideal para cada cliente j.

$$LD_z = \frac{\sum_{j \in C_z} l_j}{\sum_{j \in C_z} D_j} \tag{4.5.3}$$

Onde:

- l_j: Unidades entregues para cada cliente j da zona z
- D_j: Demanda do cliente j da zona z

3.9 Restrições do problema

Para que as soluções geradas sejam viáveis, as mesmas devem respeitar algumas restrições do problema, que são representadas pelas expressões a seguir. A primeira restrição é dada na equação (4.6.1), que estabelece que o fluxo dentro de uma instalação deve existir somente se ela estiver aberta. Isso implica que só há fluxo quando a variável of_i for igual a 1, e no caso em que o seu valor é zero, não deve haver fluxo.

$$ak_i + \sum_{j \in SU_i} sf_{ij} + \sum_{j \in SU_i} \sum_{t=1}^{T} \sum_{\theta \in \Theta} {f_{ijt}}^{\theta} - G \times of_i \leq 0 \qquad \forall i \in (M' \cup W') \tag{4.6.1}$$

Onde se encontram as variáveis de decisão:

- ak_i: Aumento de capacidade na instalação i
- ${f_{ijt}}^{\theta}$: Fluxo da instalação i para a j, no t-ésimo período em recuperação do evento θ

- of_i: Indica se a instalação i será construída
- sf_{ij}: Fluxo de peças da instalação i para a j em um período normal

E o parâmetro usado foi:

- G: Um número grande

A restrição (4.6.2) garante que o montante de material que sai dos fornecedores S deve ser equivalente à quantidade de produtos, que utilizam essa matéria-prima que sai das manufaturas.

$$\sum_{j \in S_i} sf_{ij} = \sum_{j \in P_i} sf_{ji} \qquad \forall i \in (M \cup W) \tag{4.6.2}$$

Onde as variáveis de decisão são:

- sf_{ij}: Fluxo de insumos que saem dos fornecedores S para as manufaturas
- sf_{ji}: Produtos acabados que saem de manufaturas M e de distribuidores W

Já a inequação (4.6.3) trata da garantia de que o que deixa cada instalação deve ser igual ou menor ao que entra na mesma.

$$\sum_{j \in S_i} sf_{ij} \leq IK_i + ak_i \qquad \forall i \in (S \cup M \cup W) \tag{4.6.3}$$

Onde está presente o seguinte parâmetro:

- IK_i: Capacidade inicial instalada na instalação i

E as variáveis de decisão são as já explicitadas sf_{ij}, fluxo entre instalações, e ak_i, aumento da capacidade da instalação i.

Na equação (4.6.4), fica estabelecido que o que sai dos armazéns deve ser igual à demanda atendida dos clientes.

$$\sum_{i \in W} sf_{ij} = l_j \qquad \forall j \in C \tag{4.6.4}$$

Onde:

- sf_{ij}: Insumos que saem das manufaturas W para clientes C
- l_j: Nível ótimo de serviço para o cliente j

As inequações (4.6.5) asseguram que a quantidade de manufaturas e armazéns abertos devem ser pelo menos igual a um. Assim, garante-se que a cadeia tem pelo menos o mínimo de instalações para atuar.

$$\sum_{i \in M} of_i \geq 1 \; e \; \sum_{i \in W} of_i \geq 1 \tag{4.6.5}$$

A inequação (4.6.6) é responsável por manter a alimentação dos insumos em uma instalação igual ou menor do que a saída no período t de recuperação do evento disruptivo θ, assim como é feito em 4.6.2 em cenários normais.

$$\sum_{j \in PR_i} {f_{jit}}^{\theta} = \sum_{j \in SU_i} {f_{ijt}}^{\theta} \qquad \forall (i \in \{M \cup W\}, t, \theta) \tag{4.6.6}$$

Onde:

- ${f_{jit}}^{\theta}$: Insumos que saem dos fornecedores S para as manufaturas W
- ${f_{ijt}}^{\theta}$: Produtos acabados que saem de manufaturas M e de distribuidores W

A inequação (4.6.7) garante que a saída das instalações nos períodos disruptivos deve ser igual ou menor à sua capacidade.

$$\sum_{j \in SU_i} {f_{ijt}}^{\theta} \leq {k_{it}}^{\theta} \qquad \forall (i \in \{S \cup M \cup W\}, t, \theta) \tag{4.6.7}$$

Onde:

- ${f_{ijt}}^{\theta}$: Fluxo da instalação i para a j no t-ésimo período em recuperação do evento θ
- ${k_{it}}^{\theta}$: Capacidade da instalação i no t-ésimo período de recuperação do evento θ

A equação (4.6.8) tem a função de calcular qual deve ser a capacidade das instalações em um cenário disruptivo.

$${k_{it}}^{\theta} = (IK_i + ak_i) \times {\Gamma_i}^{\theta} + \sum_{\rho=0}^{t-1} {r_{i\rho}}^{\theta} \qquad \forall (i \in \{M \cup W\}, t, \theta) \tag{4.6.8}$$

Onde:

- IK_i: Capacidade inicial instalada na instalação i
- ${\Gamma_i}^{\theta}$: Impacto (porcentagem da capacidade afetada) do evento θ na instalação i

- ${r_{i\rho}}^{\theta}$: Taxa que a instalação i se recupera no período t de recuperação do evento θ

A inequação (4.6.10) determina que a capacidade do sistema em cenários nos quais ocorrem disrupções deve ser menor ou igual à apresentada em um cenário normal.

$$ {k_{it}}^{\theta} \leq IK_i + ak_i \qquad \forall (i \in \{M \cup W\}, t, \theta) \tag{4.6.9} $$

Onde IK_i e ak_i já foram explicitados.

A inequação (4.6.10) determina que a capacidade do sistema no último período de recuperação (T) deve ser necessariamente igual à capacidade do sistema em um cenário normal.

$$ {k_{iT}}^{\theta} = IK_i + ak_i \qquad \forall (i \in \{M \cup W\}, t, \theta) \tag{4.6.10} $$

A inequação (4.6.11), onde sf_{ij} , IK_i, ak_i e l_j já foram explicados, estabelece que o que sai de instalações para suprir as demandas de outro agente da cadeia de suprimentos deve, ou fornecer exatamente a quantidade requerida, ou fornecer toda a quantidade disponível, sendo escolhido o menor valor dentre eles.

$$ sf_{ij} = \min \left[\left(IK_i + ak_i - \sum_j sf_{ij} \right), \left(l_j - \sum_i sf_{ij} \right) \right] \qquad \forall (i \in \{M \cup M \cup W\}, j \in SU_i) \tag{4.6.11} $$

A equação (4.6.12) estabelece que os recursos de recuperação não devem ultrapassar a quantidade inicial de recursos de operação disponíveis.

$$ \sum_{i \in \{M \cup W\}} RR_i \times {r_{it}}^{\theta} \leq IR + ar \qquad \forall (t, \theta) \tag{4.6.12} $$

Onde estão presentes os parâmetros:

- RR_i: Recursos necessários para recuperar uma unidade de capacidade na instalação i
- IR: Recursos de recuperação disponíveis inicialmente

E as variáveis de decisão são:

- ${r_{it}}^{\theta}$: Capacidade da instalação i que foi restaurada no t-ésimo período de recuperação do evento θ

- ar: Recursos de recuperação adicionais disponíveis no início

A equação (4.6.13) estabelece que a quantidade de recursos de recuperação adicionais deve ser suficiente para recuperar toda a capacidade da rede de suprimentos, para todos os cenários, em no máximo T períodos de recuperação. Essa equação tem o papel computar os recursos de contingência em períodos disruptivos. Dessa forma, a recuperação do sistema, representada pelo lado esquerdo da expressão, deve ser um valor menor ou igual ao de recursos disponíveis somados aos recursos de recuperação.

$$ar + IR \geq \max_{\theta} \left[\frac{\sum_{i \in \{M \cup W\}} (IK_i + ak_i) \times {\Gamma_i}^{\theta} \times RR_i}{T} \right] \tag{4.6.13}$$

Onde ar, IR, IK_i, ak_i e ${\Gamma_i}^{\theta}$ já foram explicitados.

A inequação apresentada em (4.6.14) determina que o fluxo que alcança o cliente, durante os períodos de recuperação, tem que ser menor ou igual à demanda que se almejava atender.

$$\sum_{i \in W} {f_{ijt}}^{\theta} \leq l_j \qquad \forall (j \in C, t, \theta) \tag{4.6.14}$$

A equação (4.6.15) estabelece a restrição de que no último período de recuperação, a capacidade de atender a demanda deve ser igual à normal, que era apresentada antes da ocorrência do evento problemático.

$$\sum_{i \in W} \sum_{t} {f_{ijT}}^{\theta} = l_j \qquad \forall (j \in C, \theta) \tag{4.6.15}$$

Onde l_j já foi explicada anteriormente, e:

- ${f_{ijT}}^{\theta}$: Fluxo dos armazéns W para cliente C no último período de recuperação T

A expressão (4.6.16) existe para garantir que o valor da variável de decisão de abertura de instalações seja necessariamente igual a zero, no caso em que a instalação não está aberta, ou 1, no caso em que a instalação abre.

$$of_i \in \{0,1\} \tag{4.6.16}$$

A expressão (4.6.17) estabelece a não negatividade das variáveis de decisão, pois no caso em que elas não são nulas, devem assumir valores naturais iguais ou maiores do que um.

$$ak, ar, sf_{ijt}, si_i, {f_{ijt}}^{\theta}, {r_{it}}^{\theta} \in \mathbb{N} \tag{4.6.17}$$

Por fim, os níveis de atendimento de demanda l_j devem ser valores entre IL_j, que representa o nível mínimo de serviço que deve ser oferecido para o cliente j, e D_j, que é a demanda total do cliente j, como está descrito na expressão (4.6.18).

$$IL_j \leq l_j \leq D_j \qquad \forall j \in C \tag{4.6.18}$$

3.10 Algoritmo genético multiobjetivo

A partir do modelo multiobjetivo apresentado, é possível inferir que existe uma quatidade alta de variáveis envolvidas na modelagem de uma rede de suprimentos. Para cada caso, há um total de M+W variáveis of_i e ak_i, C variáveis para l_j, uma variável ar, SM+ MW+ WC variáveis sf_{ij}, (SM+ MW+ WC) $T\Theta$ variáveis ${f_{ijt}}^{\theta}$ e (M+W) $T\Theta$ para ${r_{it}}^{\theta}$. Por exemplo, ao analisar uma rede simples com apenas três fornecedores ($S = 3$), três manufaturas ($M = 3$), quatro armazéns ($W = 4$) e cinco clientes ($C = 5$), considerando cinco períodos para alcançar a restauração completa de ($T = 5$) e sete possíveis cenários disruptivos, haveria em torno de 2.500 variáveis de decisão, e muitas delas são definidas em faixas de ordem de 10^3.

Na rede aqui analisada, que conta com dois fornecedores ($S = 2$), duas manufaturas ($M = 2$), seis armazéns ($W = 6$) e vinte e dois clientes ($C = 22$), considerando três períodos para alcançar a restauração completa de ($T = 3$) e dezoito cenários disruptivos ($\Theta = 18$), existem mais de 10.500 variáveis de decisão. Devido à quantidade de variáveis e ao tamanho do espaço de soluções, a obtenção de soluções por meio de métodos exaustivos para formar o conjunto Pareto-ideal é proibitivo devido ao tempo e custo computacional. Por isso, foi proposto um Algoritmo Genético Multi-Objetivo (MOGA).

Um indivíduo gerado no MOGA corresponde a uma lista contendo cada variável de decisão, sendo ele da forma $[of_i, ak_i, l_j, ar, sf_{ij}, {f_{ijt}}^{\theta}, {r_{it}}^{\theta}]$, em uma tipificação codificada por inteiros (Equações 4.6.17 e 4.6.18). Para obter um conjunto Pareto-ideal, a relação de dominância é avaliada com base na avaliação de cada indivíduo, que é um vetor de cinco dimensões, $F = [F1, F2, F3, F4, F5]$, calculado analiticamente de acordo com as equações

referentes a cada um desses objetivos. Assim, o MOGA utiliza os múltiplos objetivos do problema sem transformá-lo em um problema de função única.

Devido à grande quantidade de variáveis, os operadores genéticos utilizados na busca de soluções são desenvolvidos para gerar apenas indivíduos viáveis, evitando perda tempo analisando soluções inviáveis. Consequentemente, não há emprego de métodos de penalização. Desta forma, o MOGA proposto é personalizado para o modelo de otimização deste trabalho. A Tabela 4 define os parâmetros utilizados no MOGA proposto.

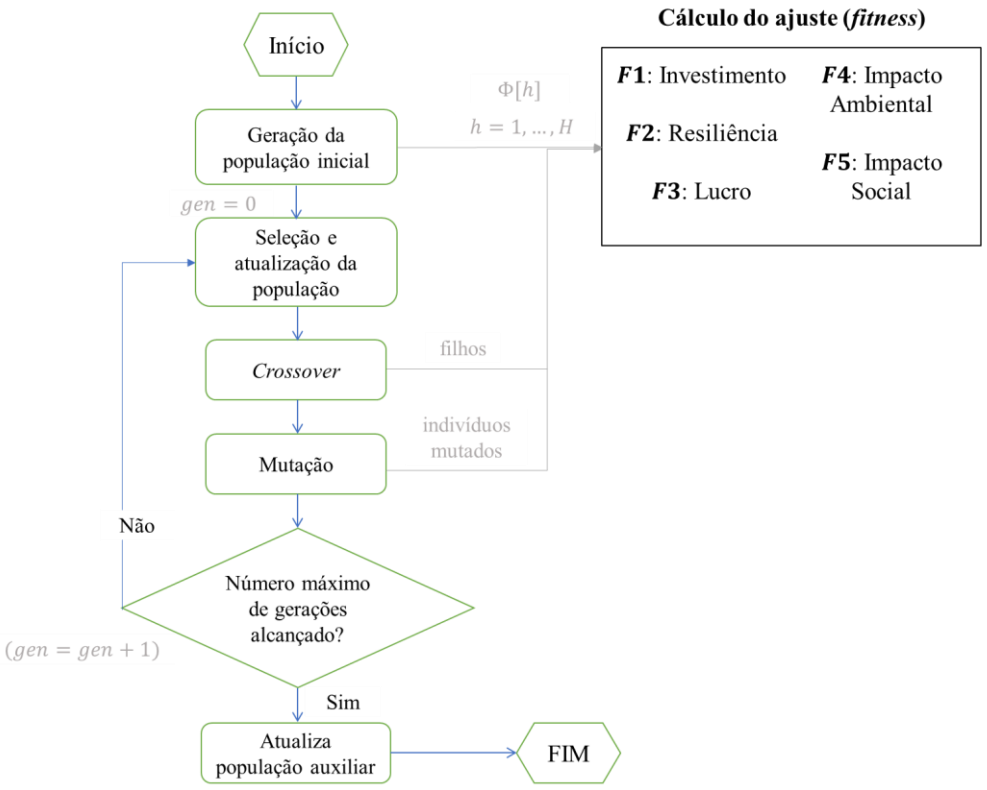
Tabela 4 - Parâmetros do algoritmo genético multiobjetivo

Parâmetro	**Descrição**
H	Tamanho da população Φ
p_{cr}	Probabilidade de *crossover*
p_{mt}	Probabilidade de mutação
N_{gen}	Número de gerações

Fonte: a autora, 2021

Seja H o tamanho fixo da população Φ, e $\Phi[h]$ sendo o $h^{ésimo}$ indivíduo (ou solução) de Φ, e Φ_{aux} sendo a população auxiliar que armazena indivíduos não dominados e é atualizada a cada iteração. Com exceção da etapa de Geração da População Inicial, todas as etapas são repetidas para a N_{gen} vezes, onde cada iteração é uma geração MOGA. Depois disso, a Seleção e Φ_{aux} as etapas de atualização são realizadas pela última vez e o algoritmo fornece aos indivíduos factíveis indicados de Φ_{aux}. A Figura 4 ilustra como o algoritmo descrito funciona.

Figura 4 - Fluxograma do algoritmo genético multiobjetivo proposto



Fonte: a autora, 2021

3.10.1 Geração da população inicial

Para gerar a população inicial composta apenas por indivíduos viáveis, uma regra específica para cada variável de decisão foi formulada, garantindo que nenhuma restrição foi violada. A cada execução, os valores de cada variável que compõem o indivíduo $(of_i, ak_i, l_j, ar, sf_{ij}, {f_{ijt}}^{\theta}, {r_{it}}^{\theta})$ são estabelecidos, sendo o indivíduo $\Phi[h]$ o resultado da $h^{ésima}$ iteração. A população inicial é gerada após a execução dos procedimentos H vezes. Esses procedimentos são muito importantes, pois também são utilizados nas etapas de *Crossover* e Mutação. Para os procedimentos são descritos a seguir.

- Geração de of_i: É definido $of_i = 1$ para todas as instalações inicialmente abertas $i \in \{M' \cup W'\}$ e, para as demais que não estão abertas ($i \in \{M'' \cup W''\}$), o valor 0 ou 1 é gerado aleatoriamente. Se todos os of_i's forem iguais a 0, para $i \in M$, uma manufatura é selecionada aleatoriamente e atribuída $of_i = 1$. Isso é feito igualmente para armazéns $(i \in W)$, garantindo que haja pelo menos uma instalação de cada tipo aberta;
- Geração de ak_i: Todos os valores de ak_i são gerados aleatoriamente entre 0 e o valor máximo predefinido para i;

- Geração de l_j: Inicialmente, a capacidade da rede para suprir a demanda dos clientes é determinada como a capacidade máxima do nível com menor capacidade da rede de suprimentos. Em seguida, é definido, com 0,5 de probabilidade, se a rede atenderá o maior número possível de produtos para os clientes. Caso positivo, as variáveis são geradas aleatoriamente, com valor mínimo de IL_j, mas de forma que $\sum_{j\in C} l_j = \min\left[capacidade\ da\ rede, \sum_{j\in C} D_j\right]$. Caso contrário, as variáveis l_j são geradas aleatoriamente entre o IL_j e D_j, de maneira que $\sum_{j\in C} l_j \leq capacidade\ da\ rede$, evitando que a demanda atendida seja maior do que o quanto a rede pode fornecer.
- Geração de sf_{ij}: Primeiro, os fluxos são gerados para $i \in W$ e $j \in C$. Para cada cliente j, um armazém i é escolhido aleatoriamente e sf_{ij} é definido como l_j se o armazém tiver capacidade suficiente (as capacidades são atualizadas sempre que um fluxo é declarado). Caso contrário, toda a capacidade de i é usada e outro armazém é selecionado aleatoriamente para fornecer o nível restante de serviço. Os mesmos processos são realizados para os fluxos $M \rightarrow W$ e $S \rightarrow M$, porém, nestes casos, o nível de atendimento direcionado a uma instalação de cliente j é o fluxo total enviado dele para seus clientes ($\sum_{k\in SU_j} sf_{jk}$);
- Geração de ar: a variável ar é definida aleatoriamente entre $IR - \max_{\theta}\left[\sum_{i\in\{M\cup W\}}(IK_i + ak_i) \times \Gamma_i{}^{\theta} \times RR_i/T\right]$ e um valor máximo predefinido;
- Geração de ${r_{it}}^{\theta}$: Para cada cenário θ, as taxas de recuperação são pré-definidas como 0, e depois atualizadas para instalações i instalações afetadas pelo evento disruptivo, cujo $\Gamma_i{}^{\theta} \neq 0$. Para cada período t, em sequência, as necessidades de recuperação são atualizadas, com base nas taxas dos períodos anteriores. Em seguida, é avaliado se o recurso disponível é suficiente para cobrir totalmente as necessidades de todas as instalações afetadas. Se assim for, ${r_{it}}^{\theta}$ é definido pela capacidade total de recuperação da instalação i. Caso contrário, é avaliado se o recurso disponível é suficiente para recuperar todas as instalações afetadas, ou seja, suas capacidades de uso ($\sum_{i\in SU_i} sf_{ij}$), e, se os recursos forem suficientes, ${r_{it}}^{\theta}$ é definido pela falta de capacidade utilizada da instalação i, e o recurso restante é distribuído aleatoriamente entre as instalações afetadas, de forma que nenhuma receba mais recursos do que precisa para se recuperar totalmente. Caso contrário, as taxas de recuperação são definidas aleatoriamente para as instalações afetadas limitadas por suas necessidades e pela disponibilidade de recursos.

- Geração de sf_{ij}: Primeiro, os fluxos são gerados para $i \in W$ e $j \in C$. Para cada cliente j, um armazém i é escolhido aleatoriamente e sf_{ij} é definido como l_j se o armazém i tiver capacidade suficiente (as capacidades são atualizadas sempre que um fluxo é declarado). Caso contrário, toda a capacidade de i é usada e outro armazém é selecionado aleatoriamente para fornecer o nível restante de serviço. Isso é realizado para os fluxos $M \rightarrow W$ e $S \rightarrow M$, porém, nestes casos, o nível de atendimento direcionado a uma instalação de cliente j é o fluxo total enviado dele para seus clientes ($\sum_{k \in SU_j} sf_{jk}$);
- Geração de ${f_{ijt}}^{\theta}$: O fluxo de materiais em períodos disruptivos deve ser igual aos fluxos padrão (sf_{ij}), sempre que possível. Em cada período de um cenário disruptivo, as capacidades das instalações afetadas são atualizadas em ${r_{it}}^{\theta}$. Se uma instalação afetada tiver capacidade insuficiente, seus clientes são selecionados aleatoriamente de um a um para serem penalizados, até que o limite de capacidade da instalação seja atingido. Em seguida, as instalações secundárias, com capacidade de reposição, são escolhidas aleatoriamente de um a um para abastecer os clientes penalizados. As instalações secundárias acionadas em um período também podem ser utilizadas em períodos posteriores, caso seja necessário.

3.10.2 Seleção e atualização da população auxiliar (Φ_{aux})

Os procedimentos realizados nessa etapa são baseados na seleção realizada por Lins e Droguett (2011), que foi adaptada para a modelagem aqui proposta. Nesta etapa, a relação de dominância entre os indivíduos é avaliada de acordo com seus valores de aptidão (*fitness*). Esta etapa funciona da seguinte forma:

1. Para selecionar os candidatos a entrarem na população auxiliar Φ_{aux}, a relação de dominância entre os indivíduos dentro da população atual Φ é avaliada par a par. Os dominados são removidos de Φ, e os remanescentes são elegíveis para entrar;
2. A partir dos indivíduos elegíveis de Φ, a atualização de Φ_{aux} é realizada de acordo com as seguintes regras: (a) se um candidato for dominado por um indivíduo já presente em Φ_{aux}, ele é descartado; (b) caso contrário, é adicionado a Φ_{aux}. Se o indivíduo recém adicionado domina indivíduos contidos em Φ_{aux}, todas as soluções dominadas são excluídas de Φ_{aux}.

Na primeira iteração, que corresponde à geração 0, não há indivíduos em Φ_{aux}, então, a atualização (etapa (ii)) é feita adicionando todos os candidatos selecionados na etapa (i) em Φ_{aux}. Depois de executar (i), o tamanho de Φ é reduzido. Para manter a população com H indivíduos, as soluções são selecionadas aleatoriamente a partir de Φ_{aux}, após passo (ii), e inserido em Φ. A

Figura 5 mostra o pseudocódigo para a Seleção e o procedimento de atualização de Φ_{aux}.

Figura 5 - Pseudocódigo do procedimento de SELEÇÃO e ATUALIZAÇÃO da população auxiliar

Procedimento SELEÇÃO E ATUALIZAÇÃO DE Φ_{aux}
para $h = 1, \dots, H$ **faça**
verifique a dominância dos indivíduos de $\Phi[h]$ e outros indivíduos de Φ
se $\Phi(h)$ é não dominado em Φ **então**
se $gen = 0$ **faça**
$\Phi_{aux} \leftarrow \Phi_{aux} . \langle \Phi[h] \rangle$
caso contrário
verifique a dominância dos indivíduos de $\Phi[h]$ e outros indivíduos de Φ_{aux}
se $\Phi[h]$ é não dominado em relação a cada solução de Φ_{aux} **então**
$\Phi_{aux} \leftarrow \Phi_{aux} . \langle \Phi[h] \rangle$
se $\Phi[h]$ domina indivíduos de Φ_{aux} **então**
elimine os indivíduos dominados de Φ_{aux}
caso contrário $\Phi[h]$ não entra em Φ_{aux}
caso contrário $\Phi[h]$ é descartado
Φ recebe indivíduos aleatoriamente selecionados de Φ_{aux} para manter o tamanho H
FIM do Procedimento

Fonte: a autora, 2021

3.10.3 Regras de *crossover*

Depois de realizar a Seleção e de atualizar Φ_{aux}, a etapa de *Crossover* é executada para avaliar outras soluções em regiões do espaço de buscas onde os melhores indivíduos foram encontrados, visto que apenas indivíduos não dominados sobrevivem em Φ, após a Seleção. A etapa do *Crossover* foi desenvolvida de forma que apenas indivíduos viáveis são gerados. Primeiro, indivíduos de Φ são escolhidos para participar do cruzamento. Para cada $\Phi[h]$, um número aleatório no intervalo [0,1] é gerado, e se esse número for menor que a probabilidade de *crossover*, p_{cr}, o indivíduo participa do procedimento. Em seguida, um par de indivíduos (os

pais) é escolhido aleatoriamente para gerar filhos. A Figura 6 mostra o pseudocódigo para o procedimento de crossover.

Figura 6 - Pseudocódigo do CROSSOVER

Procedimento *CROSSOVER*
  para $h = 1, \dots, H$ **faça**
    $u = random[0,1]$
    se $u \leq p_{cr}$ **então**
      $\Phi[h]$ inserido em *Cross*
    enquanto houver indivíduos em *Cross* **faça**
      um par de indivíduos é aleatoriamente selecionado de *Cross (pais)*
      $u = random[1,3]$
      se $u = 1$ **então**
        filhos = pais com l_j trocados
      caso contrário se $u = 2$ **então**
        filhos = pais com of_i e ak_i trocados
      caso contrário
        filhos = pais comar trocados
      se $u \leq 2$ **então**
        para filho[1] e filho[2] **faça**
          capacidade da rede = $min[\sum_{i\in S} IK_i, \sum_{i\in M}(IK_i + ak_i), \sum_{i\in W}(IK_i + ak_i)\,]$
          se capacidade da rede $\leq \sum_{j\in C} l_j$ **faça**
            Procedimento GERAR l_j
          Procedimento GERAR sf_{ij}
      se $u \geq 2$ **então**
        para filho[1] e filho[2] **faça**
          se $ar + IR \geq \max_{\theta}[\sum_{i\in\{M\cup W\}}(IK_i + ak_i) \times \Gamma_i^{\theta} \times RR_i / T]$ **faça**
            Procedimento GERAR ar
      para filho[1] e filho[2] **faça**
        Procedimento GERAR ${r_{it}}^{\theta}$
        Procedimento GERAR ${f_{ijt}}^{\theta}$
FIM do Procedimento

Fonte: a autora, 2021

Sabendo da quantidade e da complexidade das restrições do modelo, a simples troca de genes (variáveis) entre os pais não deve gerar filhos viáveis. Em seguida, o processo de procriação pode ser executado de três maneiras diferentes (selecionadas aleatoriamente):

- (i) os filhos são gerados como cópias dos pais, mas com variáveis l_j trocados, em seguida, os fluxos (sf_{ij} e ${f_{ijt}}^{\theta}$) e as taxas de recuperação (${r_{it}}^{\theta}$) são recalculados como no procedimento de geração da população inicial.
- (ii) as crianças são geradas pela troca de variáveis of_j e ak_i, então os fluxos (sf_{ij} e ${f_{ijt}}^{\theta}$) e as taxas de recuperação (${r_{it}}^{\theta}$) são recalculados.
- (iii) os filhos são gerados pelo intercâmbio da variável ar entre os pais, depois taxas de recuperação (${r_{it}}^{\theta}$) e fluxos ${f_{ijt}}^{\theta}$ são recalculados.

Uma solução gerada em (i) ou (ii) pode representar uma rede incapaz de atender ao novo nível de serviço l_j. Se isso ocorrer, l_jé atualizado. Da mesma forma, uma criança gerada em (ii)

ou (iii) pode apresentar recursos insuficientes para recuperar instalações em qualquer cenário. Se isso ocorrer, ar_j é atualizado.

Com o objetivo de manter a população com indivíduos H, a etapa de Substituição ocorre após o *Crossover*. A estratégia adotada é "filhos substituem os pais", ou seja, os pais são descartados, e os novos indivíduos tomam seus lugares em Φ. É importante ressaltar é possível que os filhos criados podem ser uma cópia idêntica dos pais.

3.10.4 Regras de mutação

Para explorar melhor a região de busca de soluções, a etapa de Mutação é realizada. Seu objetivo é "mutar" alguns indivíduos em Φ. Um número entre 0 e 1 é gerado aleatoriamente para cada Φ[h]. Se esse número for inferior à probabilidade de mutação (p_{mt}), uma variável de decisão (ou seja, de $of_i, ak_i, l_j, ar, sf_{ij}, {f_{ijt}}^{\theta}$ ou ${r_{it}}^{\theta}$) é selecionada aleatoriamente e é substituída por um valor aleatório obtido pelos procedimentos apresentados na etapa geração de população inicial. Para garantir a viabilidade do indivíduo, é necessário recalcular outras variáveis de decisão. O indivíduo "mutado" é inserido em Φ, no lugar de Φ[h]. O pseudocódigo da mutação está presente na Figura 7.

Figura 7 - Pseudocódigo da MUTAÇÃO

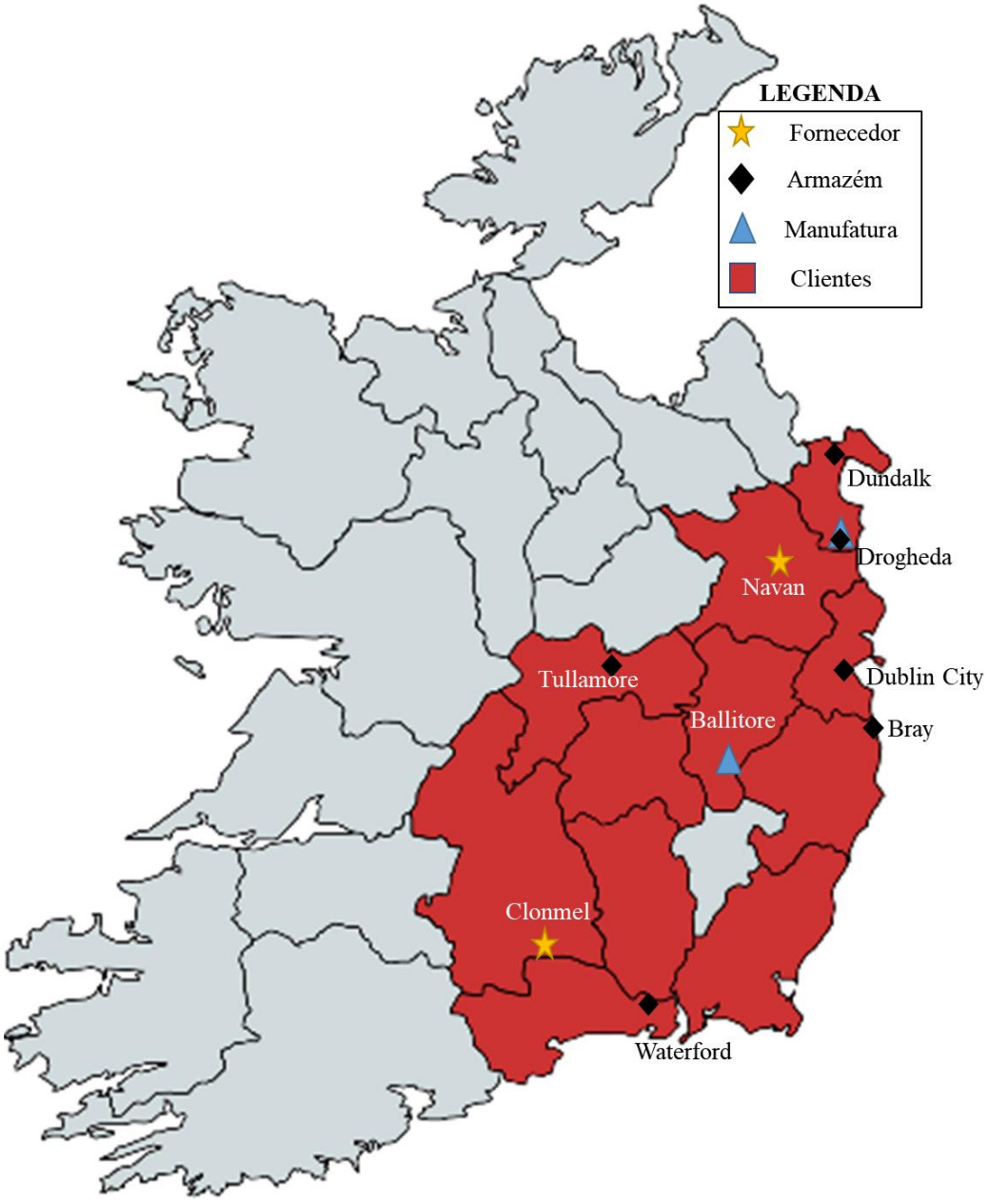
Procedimento MUTAÇAO
  para $h = 1, \dots, H$ **faça**
    $u = random[0,1]$
    se $u \leq p_{mt}$ **então**
      $var = random[\, of_i, ak_i, l_j, ar, sf_{ij}, {f_{ijt}}^{\theta}, {r_{it}}^{\theta})$
      se $var =$ of_i **faça**
        Procedimento GERAR of_i **Procedimento** GERAR ak_i
          capacidade da rede = $min[\sum_{i \in S} IK_i, \sum_{i \in M}(IK_i + ak_i), \sum_{i \in W}(IK_i + ak_i)\,]$
          se capacidade da rede $\leq \sum_{j \in C} l_j$ **faça**
            Procedimento GERAR l_j
        Procedimento GERAR sf_{ij}, **Procedimento** GERAR ar, **Procedimento** GERAR ${r_{it}}^{\theta}$,
        Procedimento GERAR ${f_{ijt}}^{\theta}$
      se $var =$ ak_i **faça**
        Procedimento GERAR ak_i
          capacidade da rede = $min[\sum_{i \in S} IK_i, \sum_{i \in M}(IK_i + ak_i), \sum_{i \in W}(IK_i + ak_i)\,]$
          se capacidade da rede $\leq \sum_{j \in C} l_j$ **faça**
            Procedimento GERAR l_j
        Procedimento GERAR sf_{ij}, **Procedimento** GERAR ar, **Procedimento** GERAR ${r_{it}}^{\theta}$,
        Procedimento GERAR ${f_{ijt}}^{\theta}$
      se $var =$ l_j **faça**
        Procedimento GERAR l_j, **Procedimento** GERAR sf_{ij}, **Procedimento** GERAR ${r_{it}}^{\theta}$,
        Procedimento GERAR ${f_{ijt}}^{\theta}$
      se $var = sf_{ij}$ **faça**
        Procedimento GERAR sf_{ij}, **Procedimento** GERAR ${r_{it}}^{\theta}$, **Procedimento** GERAR ${f_{ijt}}^{\theta}$
      se $var = ar$ **faça**
        Procedimento GERAR ar, **Procedimento** GERAR ${r_{it}}^{\theta}$, **Procedimento** GERAR ${f_{ijt}}^{\theta}$
      se $var = {r_{it}}^{\theta}$ **faça**
        Procedimento GERAR ${r_{it}}^{\theta}$, **Procedimento** GERAR ${f_{ijt}}^{\theta}$
      se $var = {f_{ijt}}^{\theta}$ **faça**
        Procedimento GERAR ${f_{ijt}}^{\theta}$
FIM do Procedimento

Fonte: a autora, 2021

4 PROBLEMA ANALISADO

O caso proposto para testar o modelo é inspirado no trabalho de Validi (2014), em que uma cadeia de suprimentos de laticínios na Irlanda foi analisada com os objetivos de minimizar os custos de operação e as emissões de CO_2 geradas tanto no transporte como nos processos de manufatura. As instalações e clientes considerados estão presentes na Tabela 1. A Figura a seguir apresenta no mapa as áreas dos clientes e as localizações das possíveis instalações da rede.

Figura 8 - Mapa com área de atendimento da demanda e localização de fornecedores, manufaturas e armazéns



Fonte: a autora, 2021

Tabela 5 - Quantidade e localização de manufaturas, armazéns e clientes da rede

	Quantidade	Localização geográfica
Manufaturas (M)	2	Drogheda, Ballitore
Armazéns (W)	6	Dundalk, Drogheda, Dublin City, Tullamore, Bray, Waterford
Clientes (C)	22	Drogheda, Dundalk, Navan, Tullamore, Naas, Newbridge, Leixlip, Port Laoise, Bray, Arklow, Wicklow, Greystones, Clonmel, Waterford, Tramore, Kilkenny, Wexford, Ennoscorthy, Dublin City, Dun Laogharie/Rathdawn, Fingal, South Dublin

Fonte: Validi (2014)

Os custos utilizados pelo autor para as manufaturas e os armazéns estão presentes nas Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente.

Tabela 6 - Custos fixo e variável de cada manufatura

Manufatura	Custo fixo	Custo variável (por unidade do produto)
Drogheda ($M1$)	1.500	0,20
Ballitore ($M2$)	2.000	0,24

Fonte: Validi (2014)

Tabela 7 - Custos fixo e variável de cada armazém

Armazéns / Custo	Dundalk ($W1$)	Drogheda ($W2$)	Dublin City ($W3$)	Tullamore ($W4$)	Bray ($W5$)	Waterford ($W6$)
Fixo	200	250	250	250	100	250
Variável	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,04

Fonte: Validi (2014)

As capacidades dos armazéns estão apresentadas na Tabela 8

Tabela 8 - Capacidades dos armazéns

Armazéns	Capacidade
Dundalk	800.000
Drogheda	1.000.000
Dublin City	1.000.000
Tullamore	1.000.000
Bray	700.000
Waterford	1.000.000

Fonte: Validi (2014)

Os custos de abrir as instalações foram estabelecidos como na Tabela 9.

Tabela 9 - Investimento para construir cada instalação

Instalação	Investimento para abrir a instalação
Manufatura 1 ($M1$)	20000000
Manufatura 2 ($M2$)	18750000
Armazém 1 ($W1$)	7500000
Armazém 2 ($W2$)	8750000
Armazém 3 ($W3$)	17500000
Armazém 4 ($W4$)	8250000
Armazém 5 ($W5$)	7000000
Armazém 6 ($W6$)	7000000

Fonte: a autora, 2021.

Os custos, bem como as emissões de CO_2, relativos aos transportes das manufaturas aos armazéns estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Custos e emissões de transporte entre manufaturas e armazéns

Manufaturas / Armazéns	Drogheda		Ballitore	
	Custo	**Emissões de CO_2**	**Custo**	**Emissões de CO_2**
Dundalk	33,63	23,68	108,11	77,70
Drogheda	1,85	1,84	108,11	77,70
Dublin City	48,42	34,09	55,25	40,62
Tullamore	101,64	74,72	57,75	47,84
Bray	68,93	48,53	65,97	48,50
Waterford	202,36	142,46	97,02	68,30

Fonte: Validi (2014)

As demandas dos clientes estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Demandas dos clientes da rede

Clientes	Demanda	Clientes	Demanda
Drogheda	25.000	Greystones	11.000
Dundalk	25.000	Clonmel	12.000
Navan	19.000	Waterford	35.000
Tullamore	9.000	Tramore	7.000
Naas	14.000	Kilkenny	16.000
Newbridge	14.500	Wexford	13.000
Leixlip	10.000	Ennoscorthy	7.000
Port Laoise	9.000	Dublin City	350.00
Bray	21.000	Dun Laogharie/ Rathdawn	138.000
Arklow	9.000	Fingal	182.000
Wicklow	7.000	South Dublin	177.000

Fonte: Validi (2014)

Os custos, bem como as emissões de CO_2, relativos aos transportes dos armazéns aos clientes estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Custos e emissões do transporte dos armazéns aos clientes da rede

	ARMAZÉNS											
	Dundalk		Drogheda		Dublin City		Tullamore		Bray		Waterford	
CLIENTES	Emissão de CO_2	Custo	Emissão de CO_2	Custo	Emissão de CO_2	Custo	Emissão de CO_2	Custo	Emissão de CO_2	Custo	Emissão de CO_2	Custo
Drogheda	30	26	2	2	46	28	101	72	68	48	202	143
Dundalk	2	2	31	26	75	53	116	86	108	76	229	161
Navan	47	33	24	20	47	28	77	54	70	49	177	105
Tullamore	116	86	102	72	92	65	2	2	108	79	128	80
Naas	99	58	79	56	33	25	59	49	44	26	123	86
Newbridge	118	83	83	61	46	32	52	43	56	37	116	82
Leixlip	83	53	44	32	16	12	80	56	34	24	147	103
Port Laoise	153	108	132	93	87	61	31	23	96	68	98	61
Bray	108	76	68	48	20	14	108	79	2	2	167	118
Arklow	153	108	118	74	65	48	122	90	47	34	96	71
Wicklow	145	98	112	79	58	48	108	79	40	33	113	93
Greystones	116	82	76	54	28	21	115	85	6	5	101	71
Clonmel	236	166	209	147	164	115	114	84	173	122	43	31
Waterford	229	161	202	143	151	97	128	80	167	118	2	2
Tramore	241	168	214	151	163	105	140	74	157	115	11	9
Kilkenny	200	140	155	100	113	71	76	56	123	60	48	34
Wexford	209	147	182	128	121	72	134	99	102	78	56	41
Enniscorthy	197	129	137	125	109	80	114	84	90	55	51	38
Dublin City	75	53	46	28	2	2	92	65	20	14	151	97
Dun Laoghaire	85	60	58	41	13	10	103	75	9	7	150	94
Fingal	64	45	27	22	19	14	106	75	39	29	173	122
South Dublin	92	65	57	47	19	14	79	50	28	17	139	88

Fonte: Validi (2014)

Além dessas informações, como o modelo aqui proposto busca abranger a resiliência da rede, cenários de disrupção com diferentes probabilidades de ocorrência foram propostos, como conta na Tabela 13.

Tabela 13 - Cenários disruptivos e suas probabilidades

		Capacidade afetada das instalações							
Cenário	**Probabilidade**	$M1$	$M2$	$W1$	$W2$	$W3$	$W4$	$W5$	$W6$
1	0,0052443294	50%	0	0	0	0	0	0	0
2	0,001362164	0	50%	0	0	0	0	0	0
3	0,00040578	0	0	50%	0	0	0	0	0
4	0,0052443294	0	0	0	50%	0	0	0	0
5	0,004027571	0	0	0	0	50%	0	0	0
6	0,0028605433	0	0	0	0	0	50%	0	0
7	0,001776195	0	0	0	0	0	0	50%	0
8	0,003276196	0	0	0	0	0	0	0	50%
9	0,0026221647	100%	0	0	0	0	0	0	0
10	0,000681082	0	100%	0	0	0	0	0	0
11	0,00020289	0	0	100%	0	0	0	0	0
12	0,0026221647	0	0	0	100%	0	0	0	0
13	0,002013786	0	0	0	0	100%	0	0	0
14	0,0014302717	0	0	0	0	0	100%	0	0
15	0,000798098	0	0	0	0	0	0	100%	0
16	0,000888099	0	0	0	0	0	0	0	100%
17	0,0001359641	50%	0	0	50%	0	0	0	0
18	0,0003399103	100%	0	0	100%	0	0	0	0

Fonte: a autora, 2021

Além dessas informações, os demais parâmetros que o modelo utiliza são relativos às condições econômicas e sociais das regiões consideradas nas decisões. Tais informações foram obtidas no site de estatísticas do governo da Irlanda, o *Central Statistics Office* (2019), que estão presentes na Tabela 14.

Tabela 14 -Cenários disruptivos e suas probabilidades

Zona (z)	UR_z	$GDPI_z$	Y_z	**Regiões**
MidEast	0,054	0,244	0,0903	Drogheda, Dundalk, Navan, Naas, Newbridge, Leixlip, Bray, Arklow, Wicklow, Greystones, Ballitore
Midland	0,080	0,184	0,0330	Tullamore, Port Laoise
MidWest	0,052	0,379	0,0863	Clonmel
SouthEast	0,072	0,238	0,0584	Waterford, Tramore, Kilkenny, Wexford, Ennoscorthy
Dublin	0,053	0,125	0,4179	Dublin City, Dun Laoghaire, Fingal, South Dublin

Fonte: a autora, 2021

Utilizando as informações da cadeia presentes no trabalho, e adicionando valores para os demais parâmetros do modelo proposto, foi formulado o problema que abrange o problema de projeto inicial de uma rede, onde não há nenhuma instalação aberta. Adicionalmente, foi proposto o problema em que há uma rede preexistente, e para ela deve ser decidido se irá adicionar novas instalações ou manter a configuração atual, sendo possível, também, aumentar a capacidade das instalações já existentes.

5 RESULTADOS

Para analisar o modelo proposto, foi considerada a situação em que o projeto da rede está em fase inicial e, portanto, deve ser decidido quais as instalações a serem abertas. Dessa forma, serão geradas soluções que levem em consideração os investimentos realizados em prol da resiliência e os impactos ambientais, sociais e econômicos gerados em cada situação. Em outras palavras, almeja-se testar o modelo em uma aplicação assim como feito por Vugrin e Turnquist (2012) e Mari *et al*. (2016).

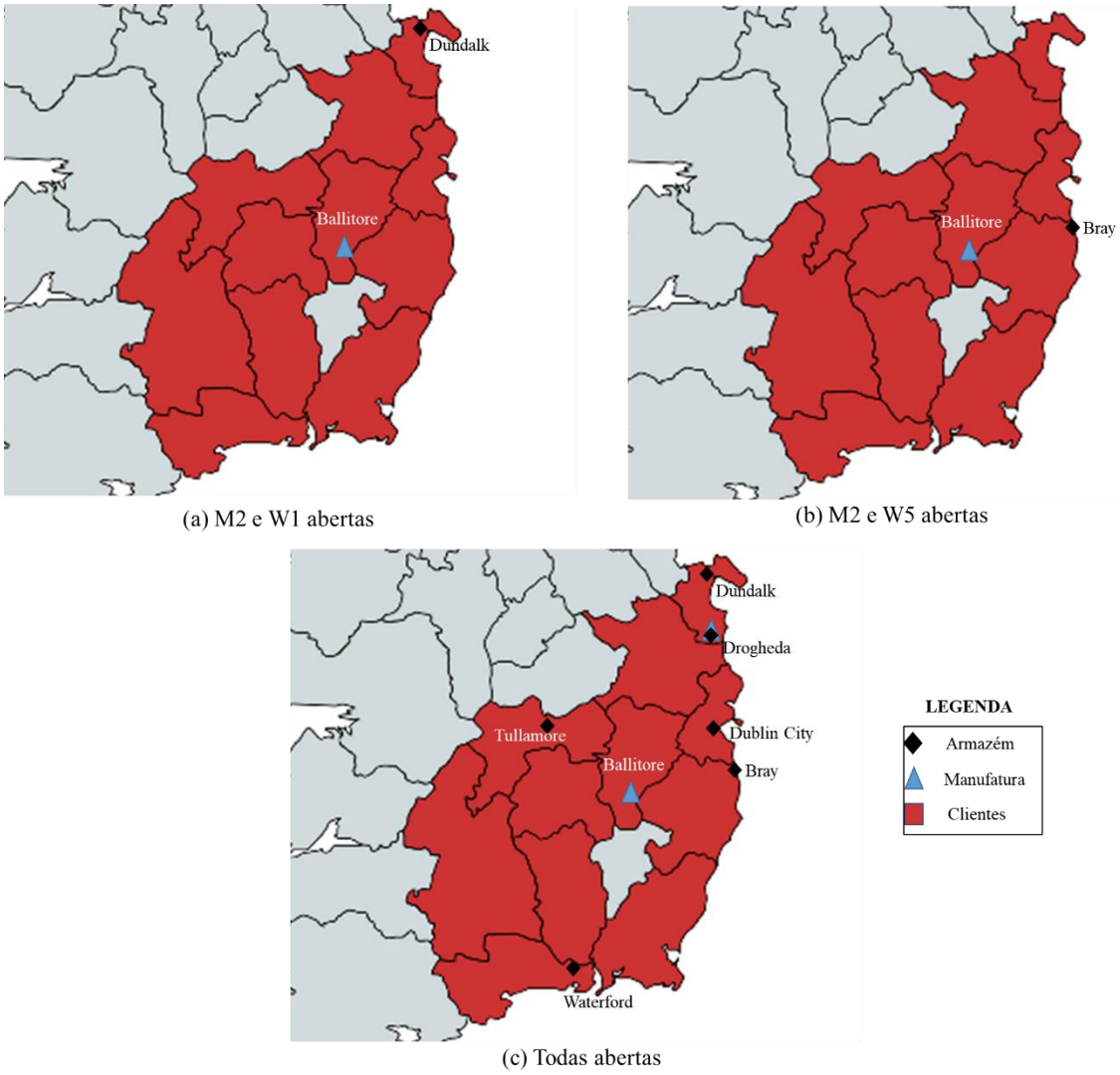
Além desse caso de projeto inicial de rede, foi também analisado o caso em que a rede de suprimentos já existe e o algoritmo deve decidir se a rede mantém a configuração atual, se investe em capacidade de acordo com o desempenho da rede nos critérios de resiliência e sustentabilidade.

Para a implementação do algoritmo genético proposto, utilizou-se o número de gerações igual a 200, o tamanho da população foi de 200 indivíduos que foram submetidos a probabilidades de 0.9 e 0.1 de sofrerem *crossover* e mutação, respectivamente.

5.1 Decisão de projeto inicial de rede de suprimentos

O projeto de uma rede de suprimentos requer tomada de decisões de longo prazo, em que serão decididas quais instalações serão construídas. Para testar o modelo nesse nível decisório, foi proposto o caso em que nenhuma instalação foi aberta e os fornecedores ainda não foram escolhidos. Nesse caso, foram geradas 1.500 soluções, e dentre elas, três arranjos foram observados, e os resultados para cada um deles estão presentes nas tabelas a seguir. A Figura 9 mostra no mapa como ficaram os arranjos obtidos nas soluções.

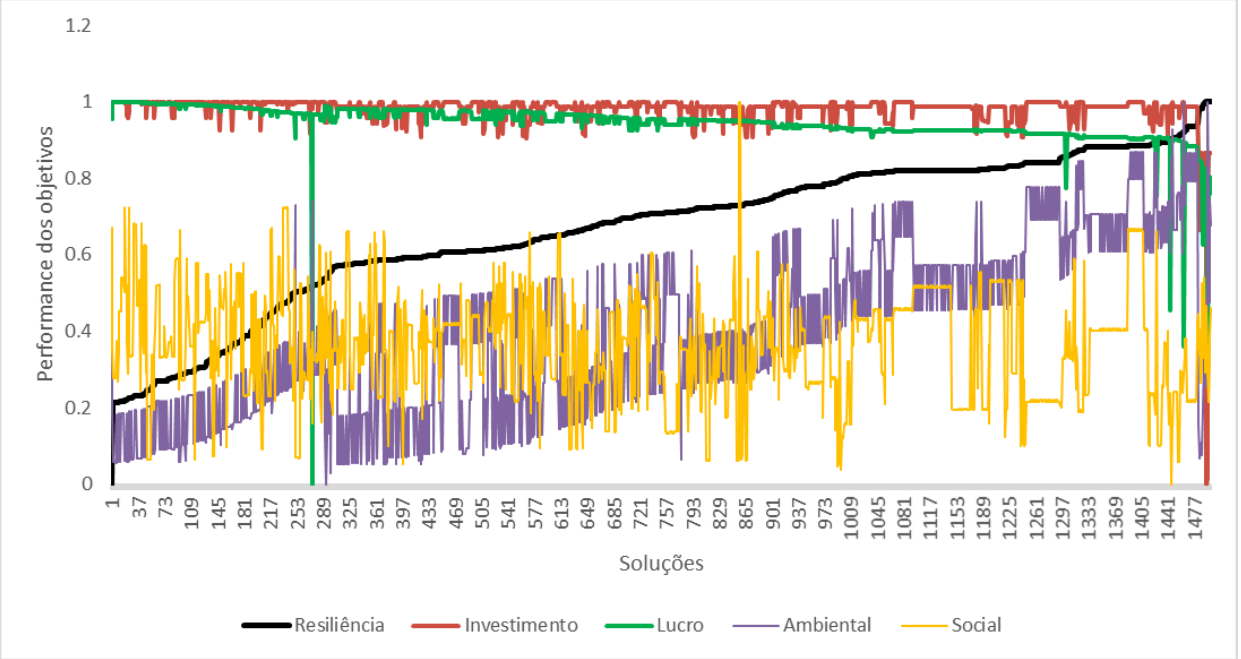
Figura 9 - Arranjos obtidos no caso de projeto inicial de rede



Fonte: a autora, 2021

Como a modelagem utiliza cinco objetivos, a representação das soluções obtidas necessitaria de seis dimensões, e, por isso, a visualização das funções fica comprometida. Para possibilitar uma apresentação das relações entre os objetivos, foi construído um gráfico em que as soluções sofreram uma transformação de escala para assumirem valores entre 0 e 1, em que o pior valor obtido no objetivo recebeu 0, e o melhor recebeu 1. A Figura 10 mostra esse gráfico com os valores das soluções crescentes em relação ao objetivo resiliência, revelando os *tradeoffs* entre os objetivos considerados na modelagem.

Figura 10 - Gráfico da resiliência crescente no caso de projeto inicial



Fonte: a autora, 2021

Ao observar a Figura 10, é possível perceber que com a melhora do objetivo resiliência, o objetivo ambiental apresenta melhora no seu desempenho. Já os demais objetivos tenderam a apresentar uma performance decrescente. No caso do investimento, apesar de o valor dessa variável ter apresentado um comportamento quase estável na maioria das soluções, o *tradeoff* entre resiliência e investimento em resiliência é mais evidente, pois onde mais se investiu, maior a resiliência da rede. Dessa forma, os valores mais altos de investimento, que estão mais próximos de zero, tenderam a se concentrar mais à direita do gráfico.

Os demais objetivos apresentaram uma ligação maior com o nível de demanda atendida, pois como a resiliência é medida como a diferença entre o nível de serviço estabelecido e o nível realmente fornecido, a quantidade de produtos entregues aos clientes influenciou as métricas estabelecidas. No caso do lucro, com menos produtos vendidos, a arrecadação cai e esse objetivo é comprometido, mas a empresa foi mais capaz de cumprir com seus compromissos.

O objetivo ambiental está ligado às emissões de carbono da rede, e ao maior número de produtos fornecidos aos clientes, consequentemente, gera mais emissões de CO_2, devido ao transporte, à produção e à aquisição de matéria-prima. Além disso, ao fornecer menor quantidade de produtos, menos mão de obra é requerida, e ainda diminui a satisfação das necessidades dos clientes, impactando negativamente o objetivo social.

No geral, os resultados com todas as soluções, que contêm várias configurações, os resultados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados para todos os arranjos no caso de projeto inicial

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	239.228.798	1.133,4	-1.044.976	661.383	10,091
Melhor	187.500.000	0	1.891.303	244.123	15,249
Pior	3.215.211.000	3.426,0	-52.126.122	938.646	7,149
Desvio	132.672.381	646,5	2.630.916	150.996	1,148

Fonte: a autora, 2021

Partindo para a análise mais focada nos diferentes arranjos obtidos, as tabelas a seguir apresentam os resultados para as soluções dos arranjos obtidos. No caso do arranjo em que a manufatura M2 e o armazém W1 foram abertos, os resultados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados arranjo M2 e W1 abertos no caso de projeto inicial

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	255.302.763	872,9	-1.195.894	666.286	10,059
Melhor	187.500.000	188,9	1.294.485	328.269	15,249
Pior	478.330.000	2.435,8	-27.651.135	938.646	7,439
Desvio	61.132.665	365,6	1.690.457	142.216	1,099

Fonte: a autora, 2021

As soluções obtidas quando foi decidido abrir as instalações de manufatura M2 e o armazém W5 estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados arranjo M2 e W5 abertos no caso de projeto inicial

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	197.315.488	1.509,7	-499.026	654.307	10,129
Melhor	187.500.000	271,1	1.891.303	244.123	13,019
Pior	439.561.000	2.698,4	-32.707.747	899.519	7,149
Desvio	32.876.611,46	732,2	2.171.156	160.287	1,216

Fonte: a autora, 2021

Já a Tabela 18 mostra as medidas das soluções para a rede formada quando se abrem todas as instalações.

Tabela 18 - Resultados arranjo com todas as instalações abertas no caso de projeto inicial

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	965.862.611	27,2	-10.044.995	684.143	10,232
Melhor	597.500.000	0	-6.367.903	245.425	11,530
Pior	3.215.211.000	72,6	-32.941.004	892.711	8,891
Desvio	807.162.764	29,9	6.221.426	188.418	0,744

Fonte: a autora, 2021

Analisando as medidas obtidas para os objetivos nos diferentes arranjos gerados, é possível observar que em nenhum caso foi superior aos demais no sentido de que obter os

melhores resultados em todos os critérios. O que é esperado, devido ao caráter multiobjetivo do problema, visto que não há uma solução "ótima", mas sim, "soluções não dominadas". Dessa forma, é possível analisar quais são os pontos fortes e fracos de cada arranjo gerado de acordo com os objetivos da modelagem.

Ao analisar os arranjos separadamente, percebe-se que os casos em que se encontram valores mais baixos para o objetivo investimento, que são os observados na Tabela 16 e na Tabela 17, apresentam também resultados piores para a resiliência. No arranjo com a manufatura M2 e o armazém W1 abertos (Tabela 16), o objetivo social obteve seu melhor valor e os valores de resiliência e ambiental são intermediários quando comparados com os demais. Para as soluções em que a manufatura M2 e o armazém W5 foram abertos, o lucro apresentou os valores mais interessantes e os objetivos ambientais e sociais são intermediários. Entretanto, a resiliência é a pior que foi obtida diante de todos os outros arranjos gerados.

Com o intuito de testar a influência das funções em particular nas soluções obtidas pelo modelo, a seguir estão apresentados os resultados obtidos ao se desconsiderar um objetivo por vez. Dessa forma, é possível visualizar quais os arranjos foram priorizados de acordo com os objetivos considerados, e como as demais métricas foram influenciadas pela exclusão de um objetivo.

5.1.1 Sem a função investimento

Aqui estão apresentadas as soluções da otimização em que se excluiu a função investimento para o caso em que não há nenhuma instalação aberta. O resultado geral, contendo as várias configurações de rede de suprimentos obtidas, está apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados para todos os arranjos no caso de projeto inicial sem a função investimento

	Resiliência	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	1.023,6	-1.361.932	616.087	9,583
Melhor	0	2.199.968	226.933	13,312
Pior	3.802,3	-36.267.729	962.713	6,934
Desvio	667,5	2.390.852	175.235	1,145

Fonte: a autora, 2021

Ao comparar esses resultados com os obtidos no caso com todas as funções, é possível perceber que os resultados, em média, foram próximos. Mas, foram alcançados valores melhores para os objetivos de lucro e impacto ambiental. Focando nos resultados de cada uma das configurações, as tabelas adiante foram construídas. Os resultados da rede que conta com a manufatura M2 e o armazém W5 os resultados estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados para M2 e W5 abertos no caso de projeto inicial sem função investimento

	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	1.204,7	-1.295.316	565.826	9,333
Melhor	252,0	2.199.968	226.933	13,093
Pior	2.897,5	-5.601.470	927.500	7,352
Desvio	827,4	2.082.366	192.291	1,125

Fonte: a autora, 2021

Os resultados da rede que abriu todas as instalações possíveis estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados para todas as instalações abertas no caso de projeto inicial sem função investimento

	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	109,1	-14.520.285	577.625	9,843
Melhor	0	866.841	331.110	12,445
Pior	1.450,7	-36.267.729	899.401	8,182
Desvio	372,3	9.938.609	167.753	1,177

Fonte: a autora, 2021

Os resultados da rede que abriu a manufatura M1 e o armazém W5 estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados para M1 W5 abertas no caso de projeto inicial sem função investimento

	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	2810,2	-1787.848	539.593	11,541
Melhor	2314,2	-107.264	493.520	12,454
Pior	3802,3	-2.628.140	631.739	9,715
Desvio	701,5	1.188.352	65.157	1,291

Fonte: a autora, 2021

Os resultados das soluções em que a rede é formada pela manufatura M2 e pelo armazém W1 estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados para M2 W1 abertas no caso de projeto inicial sem função investimento

	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	852,3	-1.178.929	667.336	9,818
Melhor	75,2	1.556.968	249.002	13,312
Pior	1.664,3	-6.323.891	962.713	6,934
Desvio	348,1	1.431.612	139.220	1,102

Fonte: a autora, 2021

Analisando o caso de acordo com os resultados obtidos por cada tipo de solução, é possível perceber que ao se desconsiderar a função investimento, as soluções foram capazes de

alcançar performances mais interessantes para alguns dos objetivos quando comparadas com as soluções com o mesmo arranjo no caso geral. O arranjo M2 W1 conseguiu encontrar melhores valores de lucro, de resiliência e de impacto ambiental, apesar de que as médias das soluções ficaram bem próximas. O arranjo M2 W5 obteve desempenho parecido, apresentando resultados melhores de resiliência, lucro e impacto ambiental. Entretanto, nesses dois casos, o impacto social foi ligeiramente pior do que quando foram consideradas todas as funções.

Já o caso do arranjo com todas as instalações abertas, ao se desconsiderar o investimento, o objetivo resiliência foi bastante impactado na média, apesar de que foi possível chegar a melhor solução possível, que é o 0. Mas, as soluções foram bem melhores em relação ao lucro e bem parecidas nos objetivos ambiental e social. Um novo arranjo foi obtido ao se desconsiderar a função investimento, que foi o caso de M1 W5, e os resultados dele foram melhores do que os demais arranjos no que tange ao impacto social, mas os critérios de resiliência e lucro foram bem inferiores ao demais.

De forma geral, foi possível perceber que as funções de resiliência e impacto social foram atingidas com a exclusão da função investimento do modelo, obtendo valores piores do que no caso em que as cinco funções foram consideradas.

5.1.2 Sem a função resiliência

As soluções do caso em que se excluiu a função investimento quando não há nenhuma instalação aberta estão apresentadas a seguir. Comparando com os resultados que consideraram todas as funções, foram obtidos três arranjos nas soluções, assim como no caso anterior. Seu resultado geral, com todas as configurações de rede de suprimentos obtidas, está apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados para todos os arranjos sem função resiliência

	Investimento	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	189.024.030	-2.176.436	468.749	8,929
Melhor	187.500.000	1.891.315	228.240	13,779
Pior	298.546.000	-42.727.118	899.407	6,553
Desvio	4.901.340	2.546.189	224.551	1,472

Fonte: a autora, 2021

As soluções em que a configuração de rede de suprimentos obtida é a que abriu a manufatura M2 e o armazém W5, estão presentes na Tabela 25.

Tabela 25 -Resultados para M2 W5 sem função resiliência

	Investimento	Lucro	Ambiental	Social
Média	187.500.000	-2.004.226	481.874	8,967
Melhor	187.500.000	1.891.315	228.240	13,779
Pior	187.500.000	-4.535.216	899.407	6,553
Desvio	0	2.421.649	234.582	1,547

Fonte: a autora, 2021

As soluções em que a configuração de rede de suprimentos obtida é a que abriu a manufatura M1 e o armazém W5, estão presentes na Tabela 26

Tabela 26 - Resultados para M1 W5 sem função resiliência

	Investimento	Lucro	Ambiental	Social
Média	200.000.000	-3.254.761	369.268	8,642
Melhor	200.000.000	260.128	248.601	11,104
Pior	200.000.000	-4.316.981	744.048	6,553
Desvio	0	626.664	66.329	0,589

Fonte: a autora, 2021

Além disso, foi obtida uma única solução cujo arranjo é M1 W3, e seus valores estão presentes na Tabela 27.

Tabela 27 - Resultado para M1 W3 sem função resiliência

Investimento	298.546.000
Lucro	-42.727.118
Ambiental	388.653
Social	9,715

Fonte: a autora, 2021

Comparando com as soluções com todas as funções, ao se desconsiderar a resiliência, o impacto ambiental e o investimento obtiveram melhores resultados, tanto em média quanto aos melhores e piores valores encontrados. No caso do arranjo M2 W5, é possível comparar com os valores obtidos para ele considerando todas as funções, e a partir da análise se conclui que os valores de investimento, impacto ambiental e lucro foram melhores, mas o mesmo não acontece para o objetivo social.

Para o arranjo M1 W5, os valores para o investimento, para o impacto social e para o lucro foram inferiores aos que foram obtidos pelo arranjo M2 W5, mas o impacto ambiental foi melhor para esse arranjo. Já a solução encontrada cujo arranjo é M1 W3, é competitiva nos critérios social e ambiental, apesar de que foi pior do que todas as outras soluções em investimento e lucro.

Por fim, é possível dizer que a exclusão do obtivo de resiliência fez com que o investimento obtivesse valores muito mais baixos do que os obtidos com todas as funções. Dessa forma, ficou evidente o *tradeoff* entre esses objetivos, como já havia sido visto pelo gráfico da Figura 10.

5.1.3 Sem a função lucro

As soluções do caso em que se excluiu a função do objetivo lucro quando não há nenhuma instalação aberta estão apresentadas a seguir. Nessa otimização, foi encontrada maior variedade de arranjos do que no caso geral. Inclusive, configurações com apenas uma manufatura aberta em que abriu a instalação M1, assim como configurações com único armazém aberto contendo apenas um dos armazéns W2 ou W3 abertos, o que não aconteceu para o caso com as cinco funções. Seu resultado geral, com todas as configurações de rede de suprimentos obtidas, está apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados para todos os arranjos sem função lucro

	Investimento	**Resiliência**	**Ambiental**	**Social**
Média	207.827.204	410,6	308.404	8,614
Melhor	187.500.000	0	224.700	10,650
Pior	2.080.205.000	1.477,9	377.084	6,413
Desvio	85.530.711	229,3	34.309	1,266

Fonte: a autora, 2021

No caso do arranjo em que a manufatura M2 e o armazém W1 foram abertos, os resultados estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados para M2 W1 sem função lucro

	Investimento	**Resiliência**	**Ambiental**	**Social**
Média	225.000.000	196,1	296.516	8,698
Melhor	225.000.000	150,1	226.943	10,608
Pior	225.000.000	227,5	344.041	7,107
Desvio	0	29,9	45.276	1,311

Fonte: a autora, 2021

As soluções obtidas quando foi decidido abrir as instalações de manufatura M2 e o armazém W5 estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Resultados para M2 W5 sem função lucro

	Investimento	Resiliência	Ambiental	Social
Média	187.500.000	353,1	317.689	8,650
Melhor	187.500.000	150,3	226.105	10,609
Pior	187.500.000	430,7	361.194	6,413
Desvio	0	36,2	29.063	1,277

Fonte: a autora, 2021

As soluções obtidas quando foi decidido abrir as instalações de manufatura M1 e o armazém W3 estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Resultados para M1 W3 sem função lucro

	Investimento	Resiliência	Ambiental	Social
Média	287.500.000	1.056,8	301.325	6,787
Melhor	287.500.000	972,5	277.985	10,269
Pior	287.500.000	1.279,9	347.238	6,453
Desvio	0	63,6	16.513	0,781

Fonte: a autora, 2021

As soluções obtidas quando foi decidido abrir as instalações de manufatura M1 e o armazém W1 estão apresentados na Tabela 32

Tabela 32 - Resultados para M1 W1 sem função lucro

	Investimento	Resiliência	Ambiental	Social
Média	237.500.000	642,9	302.022	8,489
Melhor	237.500.000	479,8	225.419	9,113
Pior	237.500.000	695,8	326.821	6,414
Desvio	0	33,1	15.559	1,058

Fonte: a autora, 2021

Tabela 33 mostra as medidas das soluções para a rede formada quando se abrem todas as instalações

Tabela 33 - Resultados para todas as instalações abertas sem função lucro

	Investimento	Resiliência	Ambiental	Social
Média	1.294.509.500	0	319.621	8,439
Melhor	597.500.000	0	279.844	10,650
Pior	2.080.205.000	0	377.084	6,426
Desvio	698.418.602	0	33.583	1,534

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 34 mostra as medidas das soluções para a rede formada quando se abrem as instalações de manufatura M1 e armazém W5.

Tabela 34 Resultados para M1 W5 sem função lucro

	Investimento	Resiliência	Ambiental	Social
Média	200.000.000	750,1	288.899	9,007
Melhor	200.000.000	580,9	225.274	10,229
Pior	200.000.000	1060,1	347.747	7,424
Desvio	0	78,7	25.113	0,557

Fonte: a autora, 2021

As soluções para o arranjo composto pelas instalações M1 e W2 estão na Tabela 35.

Tabela 35 Resultados para M1 W2 sem função lucro

	Investimento	Resiliência	Ambiental	Social
Média	243.750.000	1,179,1	278.275	8,493
Melhor	243.750.000	948,4	224.700	10,608
Pior	243.750.000	1.477,9	340.664	7,424
Desvio	0	219,8	50.700	1,066

Fonte: a autora, 2021

Considerando os resultados da otimização com cinco objetivos, ao se retirar a função lucro, é observado que os objetivos investimento, resiliência e ambiental são beneficiados, pois todos apresentam valores mais interessantes. Mas, o objetivo social, é mais uma vez, prejudicado com a exclusão do critério lucro.

Ao se estudar as diferentes combinações de instalações obtidas, percebe-se que o arranjo em que todas as instalações estão abertas têm os maiores investimentos e de impacto ambiental, mas a resiliência é melhor do que todos os demais casos observados. Comparando os resultados desse arranjo com os obtidos na otimização com cinco funções, todos os objetivos apresentam melhores performances, com exceção do impacto social.

Assim como no arranjo em que todas as instalações abrem, os arranjos M2 W1 e M2 W5 obtidos quando se incluíam todos os objetivos apresentam melhores performances, com exceção do impacto social. As soluções cujo armazém aberto era o M1 alcançaram melhor performance no objetivo ambiental do que as que continham apenas o armazém M2, mas foram piores nos demais objetivos. De forma geral, todas as soluções foram prejudicadas no objetivo social.

5.1.4 Sem a função impacto ambiental

As soluções do caso em que se excluiu a função do objetivo impacto ambiental quando não há nenhuma instalação aberta estão apresentadas a seguir. Nessa otimização, foram encontradas as mesmas configurações do caso com todas as funções, e foi obtido um arranjo

em que são abertos dois armazéns. Seu resultado geral, com todas as configurações de rede de suprimentos obtidas, está apresentado na Tabela 36.

Tabela 36 - Resultados para todos os arranjos sem função ambiental

	Investimento	Resiliência	Lucro	Social
Média	319.402.154	1.269,8	-613.756	10,199
Melhor	187.500.000	0	2.466.964	13,334
Pior	2167.672.000	3.071,9	-44.437.931	5,622
Desvio	129.640.492	661,2	2.499.538	1,159

Fonte: a autora, 2021

As soluções em que todas as instalações se abrem têm seus resultados mostrados na Tabela 37.

Tabela 37 - Resultados para todas as instalações abertas sem função ambiental

	Investimento	Resiliência	Lucro	Social
Média	1.019.724.733	123,9	-8.430.662	10,063
Melhor	289.625.000	0	904.006	12,255
Pior	2.167.672.000	1.446,8	-23.879.200	7,311
Desvio	665.819.952	354,5	4.893.644	1,123

Fonte: a autora, 2021

No caso do arranjo em que a manufatura M2 e o armazém W1 foram abertos, os resultados estão apresentados na Tabela 38

Tabela 38 - Resultados para M2 W1 sem função ambiental

	Investimento	Resiliência	Lucro	Social
Média	339.096.902	937,5	-926.533	10,190
Melhor	225.000.000	156,7	1.592.913	13,334
Pior	477.202.000	1.688,6	-44.437.931	5,622
Desvio	76.678.837	337,2	2.417.052	1,213

Fonte: a autora, 2021

No caso do arranjo em que a manufatura M2 e o armazém W5 foram abertos, os resultados estão apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Resultados para M2 W5 sem função ambiental

	Investimento	Resiliência	Lucro	Social
Média	278.951.334	1713,7	32.353	10,216
Melhor	187.500.000	327,5	2.466.964	12,627
Pior	441.206.000	3.071,9	-10.282.922	7,177
Desvio	85.735.564	692,3	1.573.728	1,093

Fonte: a autora, 2021

Os resultados das duas soluções em que o arranjo em que a manufatura M2 e os armazéns W1 e W5 foram abertos, os resultados estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40: Resultados para M2 W5 W6 sem função ambiental

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Social**
Média	187.500.000	489,4	-22230090	10,030
Melhor	187.500.000	405,7	-9894284	10,152
Pior	187.500.000	573,2	-34565896	9,908
Desvio	0	83,8	12335806	0,121

Fonte: a autora, 2021

Considerando os resultados da otimização com cinco objetivos, ao se retirar a função ambiental, é observado que os objetivos investimento e resiliência são prejudicados. Já os objetivos lucro e social são favorecidos, apesar de que o social obteve resultados praticamente iguais mesmo que maiores em todos os casos, o lucro teve melhora considerável. Mais uma vez, o arranjo em que todas as instalações se abrem é o que possui as melhores métricas de resiliência.

Comparando o novo arranjo M2 W5 W6 com os arranjos M2 W1 e M2 W5 obtidos quando se excluiu o objetivo ambiental, o arranjo com dois armazéns superou as outras duas configurações em investimento e resiliência, mas apresentou piores performances nos demais objetivos.

5.1.5 Sem a função impacto social

As soluções do caso em que se excluiu a função do objetivo impacto social quando não há nenhuma instalação aberta estão apresentadas a seguir. Nessa otimização, foram encontrados os três mesmos arranjos do caso com todas as funções. Seu resultado geral, com todas as configurações de rede de suprimentos obtidas, está apresentado na Tabela 41.

Tabela 41 Resultados para todos os arranjos sem função social

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**
Média	226.345.772	1.263,4	-917.487	638.233
Melhor	187.500.000	0	2.011.072	216.759
Pior	4.160.520.000	2.804,2	-47.632.946	902.615
Desvio	150.349.589	734,1	2.448.589	166.912

Fonte: a autora, 2021

As medidas das soluções obtidas quando foi decidido abrir as instalações de manufatura M2 e o armazém W5 estão apresentadas na Tabela 42.

Tabela 42 - Resultados para M2 W5 sem função social

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental
Média	214.887.794	1.365,4	-754.811	633.173
Melhor	187.500.000	143,3	2.011.072	216..759
Pior	445.859.000	2.804,1	-47.632.946	902615
Desvio	56.737.167	754,2	2.434.809	169.148

Fonte: a autora, 2021

As medidas das soluções obtidas quando foi decidido abrir as instalações de manufatura M2 e o armazém W1 estão apresentadas na Tabela 43.

Tabela 43 - Resultados para M2 W1 sem função social

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental
Média	233.183.961	882,3	-1.232.836	659.972
Melhor	187.500.000	216,2	904.321	326.808
Pior	450.553.000	2.338,2	-4.458.021	902.596
Desvio	41.317.395	430.9	1.582.577	154.862

Fonte: a autora, 2021

Por fim, a Tabela 44 mostra as medidas das soluções para a rede formada quando se abrem todas as instalações.

Tabela 44 - Resultados para todas as instalações abertas sem função social

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental
Média	1.310.011.818	21,2	-9.711.998	699.150
Melhor	597.500.000	0	-6.901.865	414.657
Pior	4.160.520.000	50,6	-22.956.163	879..706
Desvio	1.223.286.574	20,5	4.329.449	131459

Fonte: a autora, 2021

Considerando os resultados da otimização com cinco objetivos para todas as configurações obtidas, ao se retirar a função social, é observado que todos os objetivos remanescentes apresentaram melhoras. Novamente, o arranjo em que todas as instalações se abrem é o que possui as melhores métricas de resiliência, inclusive a resiliência supera o caso com todas as funções e o lucro apresenta melhora, mas as funções investimento e ambiental sofrem uma piora no desempenho.

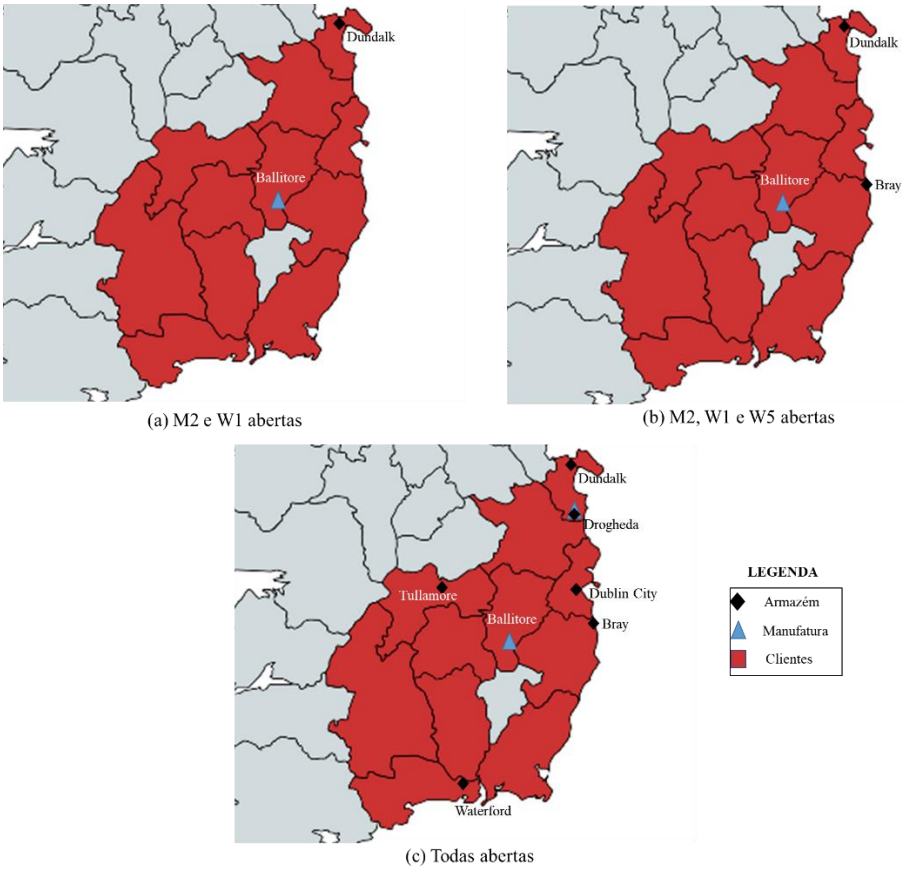
Dentre as soluções com duas instalações, foi visto que a configuração M2 W1 é superior nos critérios de investimento e lucro, mas perde da configuração M2 W5 em resiliência e impacto ambiental. Esse mesmo padrão foi observado para essas configurações na otimização com as cinco funções.

Comparando as soluções obtidas nos arranjos M2 W5 e M2 W1 quando se excluiu o objetivo social com a otimização com os cinco objetivos, M2 W1 apresentou uma leve melhora no investimento e no impacto ambiental, mas foi inferior nos critérios de resiliência e lucro. Já o arranjo com a manufatura M2 e o armazém W5 sem a função social superou os resultados da mesma configuração do caso com cinco objetivos para as funções remanescentes, com exceção do critério investimento. Esses dois casos deixaram mais evidente o *tradeoff* entre as funções de resiliência e investimento.

5.2 Decisão de redesenho de rede de suprimentos

Em situações em que já há uma rede de suprimentos operando, pode ser intessante avaliar se dadas as condições atuais, ou previsões futuras, é pertinente executar mudanças nas capacidades ou construir novas instalações. Para avaliar como o modelo responde a essa situação, foi proposto o caso em que a rede já conta com as instalações de manufatura M2 e o armazém W1 abertas. Para esse caso, as soluções geradas foram de três arranjos distintos, ilustrados na Figura 11, entre eles o inicial. Os resultados para cada um deles estão presentes nas tabelas a seguir.

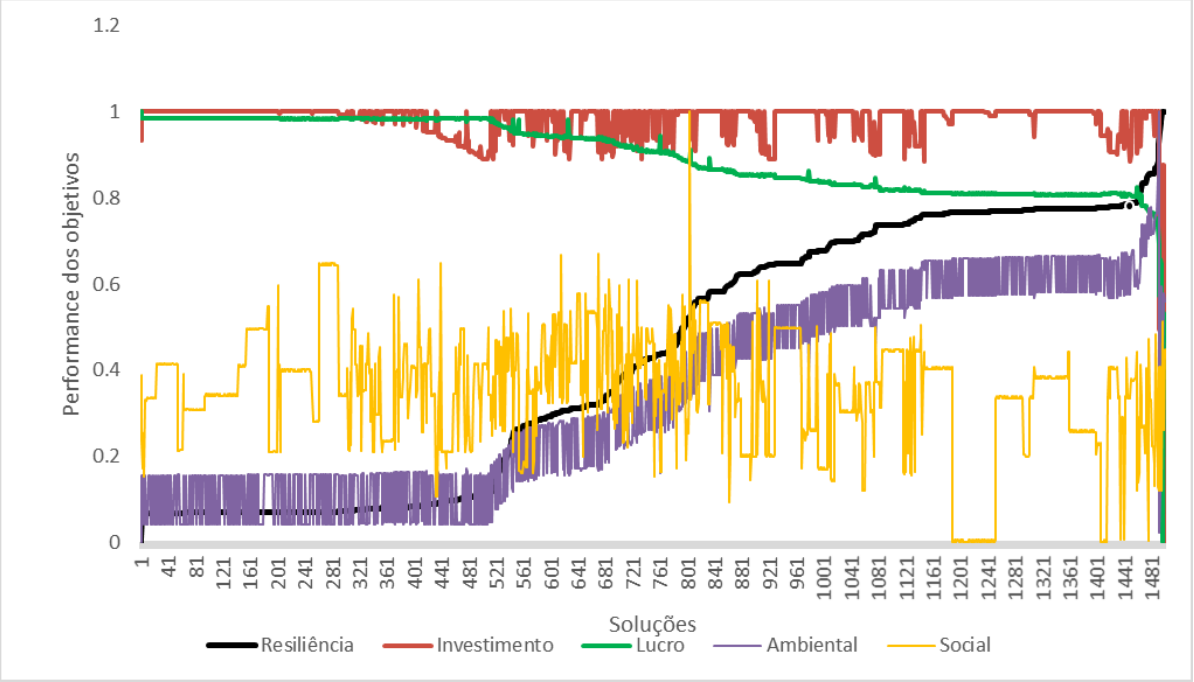
Figura 11 - Arranjos obtidos no caso de redesenho de rede



Fonte: a autora, 2021

Similarmente com o que foi feito no caso do projeto inicial de rede, foi construído um gráfico em que as soluções sofreram uma transformação de escala para assumirem valores entre 0 e 1, em que o pior valor obtido no objetivo recebeu 0, e o melhor recebeu 1. A Figura 12 mostra esse gráfico com os valores dos soluções crescentes em relação ao objetivo resiliência, revelando os tradeoffs entre os objetivos considerados na modelagem.

Figura 12 - Gráfico da resiliência crescente para o caso de redesenho da rede de suprimentos



Fonte: a autora, 2021

Analisando a Figura 12, é possível perceber que as mesmas tendências presentes no gráfico da Figura 10. Pois, da mesma maneira, com a melhora do objetivo resiliência, o objetivo ambiental apresenta melhora no seu desempenho enquanto os demais objetivos tenderam a apresentar uma performance decrescente. Entretanto, nesse caso ainda ficaram mais evidentes as tendências dos objetivos, principalmente para o lucro e o ambiental. No caso do objetivo social, os melhores desempenhos ficaram mais concentradas na porção central do gráfico, diferindo um pouco do caso em que não há nenhuma instalação prévia, em que as melhores soluções se encontravam majoritariamente à esquerda.

O comportamento do objetivo investimento foi bem similar ao do caso de desenho da rede, em que os piores valores de investimento correspondiam às soluções em que o objetivo resiliência obteve seus melhores índices. Assim como no caso anterior, os objetivos relativos à sustentabilidade apresentaram uma ligação maior com o nível de demanda atendida, visto que a melhora da resiliência foi devida à escolha de satisfazer menores parcelas da demanda, e

menores vendas implicam em menor arrecadação, menor impacto ambiental e queda no desempenho da função social.

As soluções obtidas pelo modelo para esse caso obtiveram resultados de três diferentes configurações de rede de suprimentos, o mesmo número obtido para o caso do projeto inicial. As tabelas a seguir trazem informações das soluções apresentando os números relativos às soluções obtidas. Para o resultado geral com todas as soluções, os resultados estão apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 - Resultados com todos os arranjos para o caso de redesenho

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	170.442.715	899,6	-1.175.482	668.288	9,819
Melhor	131.250.000	0	1.240.004	175.723	15,537
Pior	2.318.637.000	1.573,7	-22.448.619	933.691	6,744
Desvio	109.759.555	469,5	1.944.081	172.217	1,194

Fonte: a autora, 2021

No caso do arranjo em que a manufatura M2 e o armazém W1 foram abertos, os resultados estão apresentados na Tabela 46.

Tabela 46 - Resultados arranjo M2 W1 abertos para o caso de redesenho

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	165.480.512	906,3	-1.122.418	668.576	9,819
Melhor	131.250.000	116,1	1.240.004	175.723	15,537
Pior	383.452.000	1.573,7	-6.106.189	933.691	6,744
Desvio	67.784.894	466,7	1.790.056	172.413	1,196

Fonte: a autora, 2021

As soluções para a rede formada pela manufatura M2 e os armazéns W1 e W5, os resultados estão apresentados na Tabela 47.

Tabela 47 - Resultados arranjo M2, W1 e W5 abertos para o caso de redesenho

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	184.849.583	658,2	-1.396.032	634.957	9,895
Melhor	131.250.000	283,8	843.641	431.999	11,150
Pior	351.633.000	1.169,5	-3.326.496	812.546	7,791
Desvio	92.861.310	332,1	1.591.660	150.592	0,911

Fonte: a autora, 2021

Já a Tabela 48 mostra as medidas das soluções para a rede formada por todas as instalações.

Tabela 48 - Resultados arranjo com todas as instalações abertas para o caso de redesenho

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	1.066.839.875	18,6	-10.661.471	664.911	9,722
Melhor	403.750.000	0	-6.900.590	483.263	11,247
Pior	2.318.637.000	73,4	-22.448.619	915.482	7,795
Desvio	766.470.230	26,2	4.633.985	160.887	1,152

Fonte: a autora, 2021

Analisando as tabelas dos arranjos gerados, é possível observar que em nenhum caso foi superior aos demais no sentido de que obter os melhores resultados em todos os critérios, assim como no caso de projeto. E, mais uma vez, o arranjo em que todas as instalações estão presentes superam as demais no quesito resiliência, apesar de ter um maior custo de investimento. Além disso, é interessante ressaltar que os resultados em ambos os casos foram bem parecidos.

Os demais arranjos apresentaram valores bem parecidos, apesar de que o arranjo original da rede apresenta valores ligeiramente melhores para as funções de investimento, lucro, impacto ambiental e social. Entretanto, ao se abrir o armazém W5, a resiliência é consideravelmente atingida, e alcança níveis mais interessantes.

No geral, ao comparar o caso geral para o redesenho com o de projeto inicial de rede, é possível perceber que o impacto social e o lucro obtiveram valores ligeiramente mais baixos nesse caso, mas que a performance dos objetivos quanto à resiliência e investimento foram bem superiores. Quanto ao objetivo ambiental, os resultados foram bem parecidos em ambos os casos.

Assim com realizado para o caso de projeto de rede de suprimentos, em seguida estão apresentados os resultados obtidos ao se desconsiderar um objetivo para testar como são as soluções encontrada pelo modelo com a retirada da função em questão.

5.2.1 Sem a função investimento

As soluções do caso em que se excluiu a função do objetivo investimento no caso em que há uma rede de suprimentos preexistente estão apresentadas a seguir. Nessa otimização, foram encontrados os três mesmos arranjos do caso com todas as funções. A Tabela 49 mostra as medidas das soluções de todas as configurações obtidas no resultado geral com todas as configurações de rede de suprimentos obtidas.

Tabela 49 – Resultados de todos os arranjos no caso de redesenho sem função investimento

	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	743,0	-1.818.912	618.286	10,002
Melhor	0	1.693.069	265.853	13,676
Pior	1.705,0	-37.409.505	975.089	7,049
Desvio	425,2	2.579.842	163124	1,387

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 50 mostra as medidas das soluções de todas as configurações obtidas para M2 e W1 abertos.

Tabela 50 - Resultados M2 e W1 abertos no caso de redesenho sem função investimento

	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	750,3	-1.693.786	617.815	10,005
Melhor	175,8	1.693.068	265.853	13,676
Pior	1.705,8	-27.688.743	975..089	7,049
Desvio	422,7	1.815.875	162751	1,388

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 51 mostra as medidas das soluções de todas as configurações obtidas para M2 e W1 abertos.

Tabela 51 - Resultados para todas as instalações abertas no caso de redesenho sem função investimento

	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	33,8	-18.424.734	700.689	10,048
Melhor	0	-6.083.519	493.372	11,525
Pior	145,8	-37.409.505	909.756	7,596
Desvio	44,8	13.539.348	165.455	1,178

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 52 mostra as medidas das soluções de todas as configurações obtidas para M2, W1 e W5 abertos.

Tabela 52 - Resultados para M2 W1 e W5 abertas no caso de redesenho sem função investimento

	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	546,1	-2.058.541	597.226	9,526
Melhor	136,7	884.087	307.640	11,489
Pior	1.168,2	-5.092.573	899.812	7,153
Desvio	323.2	1.817.979	189.238	1,364

Fonte: a autora, 2021

Considerando os resultados da otimização com cinco objetivos para todas as configurações obtidas, ao se retirar a função investimento, é observado que todos os objetivos remanescentes, com exceção do lucro, apresentaram melhoras na média. Novamente, o arranjo

em que todas as instalações se abrem é o que possui as melhores métricas de resiliência, apesar de que os objetivos resiliência, ambiental e lucro no caso com todas as funções apresentarem melhores resultados, o social consegue angariar melhores valores.

Dentre as soluções com duas instalações, foi visto que a configuração M2 W1 é superior nos critérios de lucro e social, mas é pior do que a configuração M2 W1 W5 em resiliência e impacto ambiental. Observações semelhantes podem ser feitas para essas configurações na otimização com as cinco funções, apesar do objetivo social ter fugido um pouco.

Comparando as soluções obtidas nos arranjos M2 W1 W5 e M2 W1 quando se excluiu o objetivo investimento com a otimização com os cinco objetivos, M2 W1 apresentou melhora na resiliência uma leve e no impacto social, mas foi inferior nos critérios ambiental e lucro. Já o arranjo com a manufatura M2 e os armazéns W1 e W5, sem a função investimento, superou os resultados da mesma configuração do caso com cinco objetivos para as funções resiliência e ambiental.

Esse caso mostrou que a exclusão da função investimento proporcionou que soluções com melhores valores de resiliência fossem alcançados, evidenciando o efeito que o objetivo de minimizar o investimento limita a obtenção de resultados mais interessantes de resiliência, exaltando o *tradeoff* entre as funções.

5.2.2 Sem a função resiliência

As soluções do caso em que se excluiu a função do objetivo resiliência no caso em que há uma rede de suprimentos preexistente estão apresentadas a seguir. Nessa otimização, foram encontrados apenas dois arranjos, e não se obteve soluções com todas as instalações abertas. Sendo assim, é possível perceber que a presença do objetivo resiliência força a abertura de mais instalações, como é esperado. A Tabela 53 mostra as medidas das soluções de todas as configurações obtidas no resultado geral.

Tabela 53 - Resultados para todos os arranjos no caso de redesenho sem função resiliência

	Investimento	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	131.250.000	-180.040	756.467	9,786
Melhor	131.250.000	904.363	231.909	12,817
Pior	131.250.000	-5.493.881	902.734	7,470
Desvio	0	2.159.832	209.418	1,152

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 54 mostra as medidas das soluções de todas as configurações com a manufatura M2 e o armazém W1.

Tabela 54 - Resultados para M2 W1 no caso de redesenho sem função resiliência

	Investimento	Lucro	Ambiental	Social
Média	131.250.000	-176.045	756.901	9,789
Melhor	131.250.000	904.363	231.909	12,817
Pior	131.250.000	-5.493.881	902.734	7,470
Desvio	0	2.156.520	209.065	1,151

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 55 mostra as medidas das soluções de todas as configurações com a manufatura M2 e os armazéns W1 e W5.

Tabela 55 - Resultados para M2 W1 e W5 no caso de redesenho sem função resiliência

	Investimento	Lucro	Ambiental	Social
Média	131.250.000	-1.374.325	626.660	8,728
Melhor	131.250.000	892.040	302.441	10,278
Pior	131.250.000	-4.730.362	900.510	7,470
Desvio	0	2.740.239	266.603	1,098

Fonte: a autora, 2021

Ambas as soluções do caso em que se excluiu a função resiliência no caso em que há uma rede de suprimentos preexistente, foi observada queda dos valores de investimento e de impacto social. Entretanto, houve diferenças em alguns critérios quando comparados com a otimização com cinco objetivos, no arranjo M2 W1 e W5, a otimização desconsiderando a resiliência alcançou melhores resultados de lucro e de impacto ambiental. Para o arranjo M2 W1, os objetivos lucro e ambiental pioraram, mas o impacto social ficou mais próximo do obtido na otimização com todas as funções.

5.2.3 Sem a função lucro

As soluções do caso em que se excluiu a função do objetivo lucro no caso em que há uma rede de suprimentos preexistente estão apresentadas a seguir. Nessa otimização, foram encontrados apenas dois arranjos, e não se obteve soluções em que nenhuma instalação nova é aberta. A Tabela 56 mostra as medidas das soluções de todas as configurações obtidas no resultado geral.

Tabela 56 - Resultados para todos os arranjos no caso de redesenho sem função lucro

	Investimento	Resiliência	Ambiental	Social
Média	206.113.564	118,9	316.186	8,650
Melhor	131.250.000	0	255.105	9,703
Pior	2.805.974.000	188,7	369.178	7,833
Desvio	155.707.155	71,8	31.967	0,618

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 57 mostra as medidas das soluções de todas as configurações obtidas no resultado geral.

Tabela 57 - Resultados para M2 W1 W5 no caso de redesenho sem função lucro

	Investimento	Resiliência	Ambiental	Social
Média	131.250.000	161,2	315.203	8,564
Melhor	131.250.000	130,7	255.623	9,677
Pior	131.250.000	188,7	369.178	7,833
Desvio	0	13,9	27.207	0,676

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 58 mostra as medidas das soluções da configuração com todas as instalações abertas.

Tabela 58 - Resultados para todas as instalações abertas para o caso de redesenho sem função lucro

	Investimento	Resiliência	Ambiental	Social
Média	417.245.640	0	319.833	8,878
Melhor	403.750.000	0	255.105	9,703
Pior	2.805.974.000	0	367.584	7,839
Desvio	179.547.818	0	42.016	0,306

Fonte: a autora, 2021

Para ambas as soluções do caso em que se excluiu a função lucro no caso em que há uma rede de suprimentos preexistente, foi observada melhora dos valores de investimento, de resiliência e de impacto ambiental e queda no objetivo social. A diferença no impacto ambiental foi bem acentuada, o que evidenciou o *tradeoff* desse objetivo com o lucro, confirmando o que foi visto no gráfico Figura 12.

5.2.4 Sem a função impacto ambiental

As soluções em que se excluiu a função do objetivo impacto ambiental no caso em que há uma rede de suprimentos preexistente estão apresentadas a seguir. Nessa otimização, foram encontrados os mesmos três arranjos encontrados para o caso geral. A Tabela 59 mostra as medidas das soluções de todas as configurações obtidas no resultado geral.

Tabela 59 - Resultados para todos os arranjos no caso de redesenho sem função ambiental

	Investimento	Resiliência	Lucro	Social
Média	215.906.240	874,1	-901.862	10,162
Melhor	131.250.000	0	1.424.293	13,621
Pior	2.519.573.000	1.607,1	-46.929.533	6,515
Desvio	115.153.411	445,5	2.290.113	1,055

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 60 mostra as medidas das soluções em que todas as instalações foram abertas.

Tabela 60 - Resultados para todas as instalações abertas no caso de redesenho sem função ambiental

	Investimento	Resiliência	Lucro	Social
Média	777.579.523	44,5	-9.341.393	10,642
Melhor	403.750.000	0,0	-6.263.924	13,621
Pior	2.711.841.000	93,1	-46.929.533	7,605
Desvio	683.636.871	34,2	8.515.714	1,300

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 61 mostra as medidas das soluções em que o arranjo composto pelas instalações de manufatura M2 e o armazém W1 foi mantido.

Tabela 61 - Resultados para M2 W1 no caso de redesenho sem função ambiental

	Investimento	Resiliência	Lucro	Social
Média	188.368.428	1.048,1	-693.697	10,109
Melhor	131.250.000	158,4	1.374.678	13,171
Pior	387.964.000	1.607,1	-5.391.932	7,500
Desvio	59.316.059	525,51	2.157.083	0,849

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 62 mostra as medidas das soluções para cujo arranjo foi composto as instalações de manufatura M2 e o armazém W1, e além delas optou-se por abrir também o armazém W5.

Tabela 62 - Resultados para M2 W1 W5 no caso de redesenho sem função ambiental

	Investimento	Resiliência	Lucro	Social
Média	228.399.088	731,9	-946.800	10,148
Melhor	131.250.000	143,4	1.538.209	13,354
Pior	409.730.000	1.322,6	-4.947.091	6,515
Desvio	84.935.776	283,6	1.398.667	1,172

Fonte: a autora, 2021

Comparando o resultado geral obtido após a exclusão da função ambiental, é possível ver que o resultado geral foi melhor para os objetivos resiliência, lucro e social. Entretanto, na média o objetivo investimento foi pior do que o caso com as cinco funções.

Ao analisar isoladamente o caso em que todas as instalações abrem, é visível que ele é melhor no objetivo resiliência do que os demais arranjos obtidos na otimização sem a função ambiental. Quando comparado com as soluções obtidas por esse arranjo ao serem considerados os cinco objetivos, é visto que todos os objetivos considerados obtiveram melhores resultados, exceto a resiliência.

Focando nas soluções do arranjo em que abriu apenas o armazém W5, ao excluir a função ambiental, foi observado que houve piora nos valores de investimento e de resiliência, revelando que existe um *tradeoff* a ser considerado entre esses objetivos, como já havia sido observado anteriormente. As mesmas observações são feitas para os resultados em que o arranjo inicial foi mantido, mostrando que o objetivo ambiental tende a contribuir com os objetivos resiliência e investimento enquanto entra em conflito com os demais objetivos da sustentabilidade.

5.2.5 Sem a função impacto social

As soluções em que não foi considerado o objetivo impacto social no caso em que há uma rede de suprimentos preexistente estão apresentadas a seguir. Nessa otimização, foram encontrados os mesmos três arranjos encontrados para o caso geral. A Tabela 63 mostra as medidas das soluções de todas as configurações obtidas no resultado geral.

Tabela 63 - Resultados para todos os arranjos no caso de redesenho sem função social

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**
Média	171.516.678	929,1	-1.113.705	680.473
Melhor	131.250.000	0	1.082.774	235.747
Pior	3433..014.000	3.810,1	-46.788.935	1.561.069
Desvio	152.573.535	448,8	2302..617	171.946

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 64 mostra as medidas das soluções nas quais a configuração com a manufatura M2 e o armazém W1 foi mantida.

Tabela 64 -Resultados para M2 W1 no caso de redesenho sem função social

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**
Média	163.601.709	934,1	-1.024.247	679.508
Melhor	131.250.000	155,8	1.082.774	235.747
Pior	388.246.000	1.523,6	-5.452.632	902.913
Desvio	60.667.737	438,1	1.750.302	170.613

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 65 mostra as medidas das soluções da configuração com manufatura M2 e os armazéns W1 e W5.

Tabela 65 - Resultados para M2 W1 W5 no caso de redesenho sem função social

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental
Média	136.788.769	916,2	-278.850	742.710
Melhor	131.250.000	211,9	885.623	384.961
Pior	203.254.000	1.170,9	-3.827.544	901.440
Desvio	19186..859	345,3	1629..373	175.168

Fonte: a autora, 2021

A Tabela 66 mostra as medidas dos objetivos considerados obtidos pelas soluções em que todas as instalações são abertas.

Tabela 66 - Resultados para todas as instalações abertas no caso de redesenho sem função social

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental
Média	1.182.020.167	327,5	-13.014.022	731.661
Melhor	403.750.000	0	952.351	462.493
Pior	3.433.014.000	3.810,1	-46.788.935	1.561.069
Desvio	1.194.532.774	1.050,2	11.830.515	278.529

Fonte: a autora, 2021

Comparando o resultado geral obtido após a exclusão da função social, é possível ver que as médias dos objetivos apresentadas no resultado geral foram bem próximas do caso em que se considerou todas as funções, mas foram piores em todos os objetivos, exceto pelo lucro. Apesar dessa semelhança, os valores mais extremos foram piores na maioria deles, apenas os objetivos investimento e resiliência alcançaram o mesmo valor da linha "melhor", mas o da linha "pior" foi ainda mais extremo até nesses objetivos.

Ao analisar isoladamente o caso em que todas as instalações abrem, é visível que ele é melhor no objetivo resiliência do que os demais arranjos obtidos na otimização sem a função social. Quando comparado com as soluções obtidas por esse arranjo ao serem considerados os cinco objetivos, percebe-se que todos os objetivos considerados obtiveram piores resultados, revelando que o objetivo social contribui na obtenção de melhores soluções para todos os demais objetivos.

Focando nas soluções do arranjo em que abriu apenas o armazém W5, ao excluir a função ambiental, foi observado que houve melhora no objetivo investimento piora nos objetivos resiliência e ambiental. Já para os resultados em que o arranjo inicial foi mantido, todos os objetivos apresentaram melhora uma pequena melhora, exceto a resiliência que sofreu uma queda na performance.

5.3 Comparação com os resultados de Validi (2014)

Os dados utilizados nessa aplicação do modelo foram retirados do trabalho de Validi (2014), como já foi dito. Nesse trabalho, o autor tem o intuito de desenvolver uma rede de suprimentos "verde", de acordo com a visão de "*Green Supply Chain Decisions"*, para isso, emprega três métodos de otimização multiobjetivo para resolver o problema com dois objetivos, custos operacionais e emissões de carbono. Sabendo disso, fazendo um paralelo com os resultados obtidos neste trabalho e os de Validi (2014), é possível perceber que existem semelhanças ao serem consideradas as emissões de carbono e os custos de operação, mesmo que neste trabalho o conceito de sustentabilidade vá além dos impactos ambientais. Além disso, aqui são consideradas mais emissões, como a pegada de carbono das matérias-primas (*footprint*) e as emissões relacionadas à construção e expansão de instalações.

Os resultados do trabalho de Validi (2014) foram as seguintes redes de suprimentos, com seus respectivos valores para cada objetivo, como apresentado na Tabela 67.

Tabela 67 - Resultados obtidos por Validi (2014)

Tipos de otimizadores	**Armazéns abertos**	**Emissões de CO_2**	**Custos**
MOGA-II	W3 e W5	27.667	2.488.345
MOPSO	W3 e W5	27.110	2.488.052
NSGA-II	W2 e W5	24.144	2.481.960

Fonte: Validi (2014)

Como no trabalho de Validi (2014), o estudo foi feito para descobrir a rede de suprimentos que já contavam com as plantas produtivas, ou manufaturas, abertas, foi simulado o cenário em que as duas manufaturas estão abertas e não há nenhum armazém ainda. O modelo considerando resiliência e sustentabilidade obteve diferentes arranjos em suas soluções. Como esperado, as diferentes origens de emissões de carbono consideradas fizeram com que os valores obtidos fossem bem maiores. Além disso, ao considerar os custos de construir, bem como a opção de aumentar a capacidade das instalações e utilizar recursos de recuperação para lidar com os cenários disruptivos, elevaram consideravelmente os valores de investimentos.

Tabela 68 - Resultados para todos os arranjos obtidos

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	306.307.146	706,5	869.965	947.015	11,786
Melhor	193.750.000	0	6.113.867	252.488	19,766
Pior	1.098.092.000	4600,85	-9.346.784	1.615.768	6,4788
Desvio	120181079	769,6	1.936.865	228.633	2,511

Fonte: a autora, 2021

Analisando os arranjos obtidos como soluções, da Tabela 69 a Tabela 71, os resultados das três diferentes decisões de abrir armazéns propostas estão apresentados. No caso em que abriram os armazéns W5 e W6, a Tabela 69 traz as informações.

Tabela 69 - Armazéns W5 e W6 abertos

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	310.131.939	982,7	1.256.723	1.115.856	13,928
Melhor	193.750.000	0	6.113.867	292.660	19,766
Pior	1.098.092.000	4.600,8	-6.921.422	1.615.768	7,799
Desvio	155647120.3	1.055,6	2.346.903	227.931	2,460

Fonte: a autora, 2021

Já para as soluções em que foi decidido abrir apenas o armazémW5, a Tabela 70 traz os resultados referentes a elas.

Tabela 70 - Armazém W5 aberto

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	197.727.692	1251,7	265.987	793.021	10,425
Melhor	193.750.000	165,8	3.169.226	275.935	14,981
Pior	488.422.000	2178,1	-5.032.010	1.028.861	8,115
Desvio	30.962.932	495,4	1.572.532	146.888	1,102

Fonte: a autora, 2021

Nas soluções em que somente o armazém W5 abriu, os seus resultados estão apresentados na Tabela 71.

Tabela 71 - Armazém W1 aberto

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	315.919.315	436,5	667.247	839.349	10,348
Melhor	193.750.000	38,6	3.649.987	252.488	12,871
Pior	627.162.000	1.488,1	-5.279.433	1.154.562	6,479
Desvio	85.399.339	262,2	1.508.280	143.523	1,159

Fonte: a autora, 2021

Ao explorar os diferentes arranjos obtidos, é possível perceber que os que abrem os armazéns W5 e W6 apresentam os melhores resultados de impactos sociais, resiliência e lucro, mas o seu investimento é o mais alto dentre as redes propostas. Já o arranjo cujos valores de investimentos são os menores observados é o em que apenas o armazém W5 abre, entretanto ele é o que obtém os piores valores de resiliência e de lucro. Já o arranjo que apenas armazém W1 abre apresenta resultados intermediários para os demais obtidos.

Os resultados obtidos ao simular esse caso mostram a influência na obtenção de soluções de acordo com as funções objetivo selecionadas para analisar o problema. Ao considerar os

cinco objetivos, em alternativa ao caso que considera apenas custo e emissões de carbono gerados pelos transportes, é possível ver que os arranjos que foram obtidos como ótimos no caso biobjetivo já não aparecem na outra abordagem.

5.4 Testando diferentes parâmetros

Para testar a influência de alguns dos parâmetros na simulação, foram geradas soluções em que os parâmetros foram alterados. Assim, foram simuladas as decisões de redes de suprimentos considerando valores iguais para os custos de abrir instalações e menores impactos causados pelos eventos disruptivos nas capacidades das instalações.

Tabela 72 - Investimento para abrir cada tipo de instalação

Instalação	**Investimento para abrir a instalação**
Manufaturas ($M1$, $M2$)	18.750.000
Armazéns ($W1, W2, W3, W4, W5, W6$)	7.000.000

Fonte: a autora, 2021

Para o caso em que foram simuladas as situações com diferentes impactos nas capacidades causados pelos eventos disruptivos, a Tabela 73 traz os relativos impactos para cada instalação nos cenários propostos.

Tabela 73 - Cenários e impactos nas capacidades de cada instalação

		Capacidade afetada das instalações							
Cenário	**Probabilidade**	$M1$	$M2$	$W1$	$W2$	$W3$	$W4$	$W5$	$W6$
1	0,0052443294	10%	0	0	0	0	0	0	0
2	0,001362164	0	10%	0	0	0	0	0	0
3	0,00040578	0	0	10%	0	0	0	0	0
4	0,0052443294	0	0	0	10%	0	0	0	0
5	0,004027571	0	0	0	0	10%	0	0	0
6	0,0028605433	0	0	0	0	0	10%	0	0
7	0,001776195	0	0	0	0	0	0	10%	0
8	0,003276196	0	0	0	0	0	0	0	10%
9	0,0026221647	20%	0	0	0	0	0	0	0
10	0,000681082	0	20%	0	0	0	0	0	0
11	0,00020289	0	0	20%	0	0	0	0	0
12	0,0026221647	0	0	0	20%	0	0	0	0
13	0,002013786	0	0	0	0	20%	0	0	0
14	0,0014302717	0	0	0	0	0	20%	0	0
15	0,000798098	0	0	0	0	0	0	20%	0
16	0,000888099	0	0	0	0	0	0	0	20%
17	0,0001359641	10%	0	0	10%	0	0	0	0
18	0,0003399103	20%	0	0	20%	0	0	0	0

Fonte: a autora, 2021

5.4.1 Custos iguais para abrir instalações no caso de projeto inicial

Foram estabelecidos os seguintes custos de abrir instalações apresentados na Tabela 72. Ao gerar soluções com esses novos parâmetros, foram obtidas soluções de cinco diferentes arranjos de instalações. As medidas de todas as soluções estão presentes na Tabela 74.

Tabela 74 - Resultados para todos os arranjos obtidos

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	218.421.498	1.010,2	-1.498.868	604.479	9,909
Melhor	187.500.000	0	1.891.310	298.817	14,733
Pior	3.905.734.000	4.356,6	-44.231.798	902.712	7,064
Desvio	122.274.901	738,3	2.402.902	185.327	1,157

Fonte: a autora, 2021

Já as medidas dos arranjos específicos são apresentadas da Tabela 75 a . Na Tabela 75 estão presentes as medidas das soluções em que foi decidido construir a manufatura M2 e o armazém W1.

Tabela 75 - Manufatura M2 e armazém W1 abertos

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	228.507.978	746,4	-1.749.408	611.663	9,935
Melhor	187.500.000	179,1	904.223	299.768	12,881
Pior	443.353.000	1.465,6	-5.050.297	902.712	7,513
Desvio	24.456.707	410,5	1.733.371	169.897	1,157

Fonte: a autora, 2021

Para o caso em que a são abertas as instalações manufatura M1 e armazém W5, as medidas estão contidas na Tabela 76.

Tabela 76 - Manufatura M1 e armazém W5 abertos

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	249.870.000	4.100,7	-191.194	654.098	10,138
Melhor	187.500.000	3.859,7	348.562	627.206	10,907
Pior	374.610.000	4.356,6	-769.836	673.164	9,608
Desvio	88.204.499	203,1	457.411	19.561	0,557

Fonte: a autora, 2021

Já para as soluções que contam com a rede composta pela manufatura M2 e pelo armazém W5, suas medidas estão presentes na Tabela 77.

Tabela 77 - Manufatura M2 e armazém W5 abertos

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	249.870.000	4.100,7	-191.194	654.099	10,138
Melhor	187.500.000	3.859,7	348.562	627.206	10,906
Pior	374.610.000	4.356,6	-769.836	673.164	9,608
Desvio	88.204.499	203,1	457.411	19.561	0,556

Fonte: a autora, 2021

Por fim, para as soluções que contam com a rede composta por todas as instalações possíveis, suas medidas estão presentes na Tabela 78.

Tabela 78 - Todas as instalações abertas

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	1.312.151.625	15,6	-16.346.505	538.924	9,658
Melhor	515.000.000	0	-6.622.266	312.276	10,799
Pior	3.905.734.000	63,5	-44.231.798	794.986	8,366
Desvio	1.192.368.924	26,9	11.102.127	176.282	0,895

Fonte: a autora, 2021

Além dos arranjos de rede já apresentados, foi gerada uma única solução cujo arranjo é composto pelas instalações de manufatura M2 e o armazém W6 e suas medidas estão apresentadas na Tabela 79.

Tabela 79 - Solução com manufatura M2 e armazém W6 abertos

Investimento	187.500.000
Resiliência	530,6
Lucro	-18.291.983
Ambiental	517.523
Social	8,608

Fonte: a autora, 2021

Analisando as soluções obtidas nesse caso, é interessante observar que nesse caso foram obtidos mais arranjos de redes de suprimentos, mostrando que o custo de abrir influenciou na variedade de arranjos obtidos, visto que no caso em que os custos de construir uma nova instalação na etapa de projeto inicial de rede eram diferentes não havia nenhuma solução em que a manufatura M1 era aberta.

Observando os arranjos e comparando-os com os obtidos na seção 5.1, percebe-se que os valores obtidos para o investimento, a resiliência e o impacto ambiental foram melhores quando os custos de instalação são iguais, mas o lucro e o impacto social apresentam pior performance. Nas soluções em que abrem as instalações M2 e W1, esse mesmo comportamento

é observado. O arranjo contendo todas as instalações abertas, neste caso a performance apenas os objetivos de resiliência e impacto ambiental apresentaram performance superior.

Já para a soluções que contam com as instalações M2 e W5 abertas, a análise é distinta, pois o lucro é consideravelmente melhor, e os impactos ambiental e social neste caso são melhores, enquanto o objetivo investimento apresenta resultados piores.

O novo arranjo contendo a manufatura M1 apresenta resultados superiores no objetivo lucro, apesar de que seu desempenho em resiliência é bem pior do que os demais arranjos. Dessa maneira, é possível concluir que o objetivo ambiental apresenta melhores resultados ao se igualar os custos de construção de instalações, mostrando que esse parâmetro influencia no impacto ambiental gerado pela cadeia.

5.4.2 Menores impactos nas capacidades no caso de projeto inicial

Ao gerar soluções para o problema de projeto inicial de rede de suprimento considerando os parâmetros contidos na Tabela 73, apenas um arranjo foi obtido nesse caso, que foi a configuração que abriram as instalações M2 e W5.

Tabela 80 - Resultados para o caso em que se consideram menores impactos nas capacidades

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	194.600.036	120,9	6.716.163	782.486	10,373
Melhor	187.500.000	0	7.732.671	264.110	15,378
Pior	559.031.000	300,2	1.478.719	900.359	7,057
Desvio	30.986.908	101,1	749.521	82.244	1,193

Fonte: a autora, 2021

Ao comparar as soluções da Tabela 80 com os obtidos nas soluções que consideram maiores impactos dos eventos disruptivos, todos os objetivos, com exceção do ambiental, apresentam desempenhos melhores, em especial o lucro e a resiliência. O lucro apresentou soluções sempre positivas, o que não havia sido visto em nenhum outro caso . A resiliência apresentou resultados menos variados e melhores, como esperado. Já o objetivo ambiental foi o único que apresentou resultados inferiores, enquanto o social apresentou desempenho semelhante.

Com esse caso, ficou claro que o impacto dos eventos considerados influencia muito nos resultados, e com sua diminuição, menos opções de arranjos são consideradas para as soluções. Além disso, o lucro e a resiliência são as dimensões mais impactadas pelos valores deles. Por fim, o investimento também é influenciado por tais parâmetros, visto que ele apresentou resultados melhores neste objetivo, além de serem menos variados.

5.4.3 Custos iguais de abrir instalações no caso de redesenho

Ao gerar soluções para o problema de redesenho da rede de suprimentos considerando os parâmetros contidos na Tabela 72.

Tabela 81 - Resultados para todos os arranjos obtidos

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	179.780.992	910,9	-1.186.730	677.029	10,291
Melhor	128.750.000	0	1.387.352	259.886	15,267
Pior	3.356.319.000	1.606,8	-51.194.989	947.109	6,149
Desvio	161.923.619	457,9	2.520.729	166.776	1,286

Fonte: a autora, 2021

Os resultados relacionados às soluções em que a rede gerada é composta por todas as instalações possíveis, está presente na Tabela 82.

Tabela 82 - Resultados para todas as instalações abertas

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	1.195.451.667	210,4	-10.313.509	648.373	10,397
Melhor	128.750.000	0	860.239	434.423	14,291
Pior	3.356.319.000	1.465,6	-33.076.490	915.451	8,898
Desvio	1.032.886.625	489,9	8.604.615	186.982	1,418

Fonte: a autora, 2021

Já para o caso em que foi adicionada apenas o armazém W5 à rede inicial, os resultados estão presentes na Tabela 83.

Tabela 83 - Resultados para as instalações M2 W1 e W5 abertas

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	137.304.000	757,3	-944.692	698.327	10,589
Melhor	128.750.000	172,5	891.350	388.063	14,323
Pior	291.276.000	1.170,9	-4.320.462	902.267	8,075
Desvio	36.291.548	328,6	1.617.475	164.159	1,172

Fonte: a autora, 2021

Os resultados obtidos quando a rede inicial não foi alterada estão contidos na Tabela 84.

Tabela 84 - Resultados para as instalações M2 e W1 abertas

	Investimento	**Resiliência**	**Lucro**	**Ambiental**	**Social**
Média	169.911.171	921,3	-1.059.691	677.333	10,288
Melhor	128.750.000	171,8	1.387.352	259.886	15,266
Pior	377.756.000	1.606,8	-14.129.241	947.110	6,149
Desvio	72.225.576	453,0	1.771.535	166.522	1,289

Fonte: a autora, 2021

Além desses arranjos, foi encontrada uma solução única com manufatura M2 e armazéns W1, W5 e W6 abertos, cujos resultados das funções objetivo estão mostrados na Tabela 85.

Tabela 85 - Solução com manufatura M2 e armazéns W1, W5 e W6 abertos

Investimento	128.750.000
Resiliência	273,1
Lucro	-51.194.989
Ambiental	530.505
Social	10,382

Fonte: a autora, 2021

Ao contrário do que foi observado para o caso de projeto inicial de rede ao se igualarem os custos de abrir instalações, ao considerar o redesenho de rede em que a manufatura M2 já está aberta, as mesmas configurações que haviam sido encontradas no caso em que as instalações têm distintos investimentos de instalação são encontradas. Apenas uma única solução em que foi decidida uma configuração diferente, que se mostrou muito competitiva no quesito investimento, em que abriram os armazéns W1, W5 e W6, foi obtida. Assim, a variedade de arranjos é mais significativa no caso de projeto inicial.

Entretanto, há várias semelhanças com o caso em que os custos de construir as instalações eram distintos entre si. Os resultados das funções objetivo foram bem próximos nesses dois casos, com o resultado da função social ligeiramente melhor quando os custos de instalação são iguais, e os demais objetivos apresentam performance menor.

Nas soluções em que o arranjo contendo as instalações M2 e W1 se mantêm, apenas o lucro e o objetivo social apresentam melhores médias de resultados, e todos os demais apresentam piores resultados. O arranjo contendo todas as instalações abertas, neste caso a performance dos objetivos relativos à sustentabilidade apresentam melhores medidas, enquanto as performances dos outros dois objetivos são inferiores.

Já para a soluções que contam com as instalações M2, W1 e W5 abertas, ao comparar com o caso em que os custos de abrir instalações são diferentes, ao se igualarem os investimentos para abrir as instalações, soluções com melhores resultados quanto à investimento, lucro e impacto social são gerados, e os resultados nos demais objetivos são inferiores.

5.4.4 Menores impactos nas capacidades no caso de redesenho

Ao gerar soluções para o problema em que já existe uma rede de suprimento prévia, em que a manufatura M2 e o armazém W1 estão abertos, considerando os parâmetros contidos na

Tabela 73, foi observado que dois arranjos foram obtidos. Os resultados relativos a eles estão contidos na Tabela 86.

Tabela 86 - Resultados para todos os arranjos obtidos

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	151.158.604	110,0	6.673.423	802.344	10,341
Melhor	131.250.000	0	7.732.438	303.272	15,571
Pior	389.327.000	253,5	1.695.635	941.168	6,919
Desvio	53.121.980	74,7	607.649	70.668	1,101

Fonte: a autora, 2021

Já as soluções em que é decidido abrir uma nova instalação de armazém, no caso o W5, suas medidas estão apresentadas na Tabela 87.

Tabela 87 - Resultados arranjo M2, W1 e W5 abertos

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	131.250.000	116,4	6.670.719	788.463	9,991
Melhor	131.250.000	9,7	7.281.740	670.568	11,682
Pior	131.250.000	221,9	5.704.963	897.238	8,899
Desvio	0	74,9	514.176	69.419	0,695

Fonte: a autora, 2021

No caso do arranjo em que a rede de suprimentos conta apenas com a manufatura M2 e o armazém W1, os resultados estão presentes na Tabela 88.

Tabela 88 - Resultados arranjo M2 W1 abertos

	Investimento	Resiliência	Lucro	Ambiental	Social
Média	151.346.168	109,9	6.673.448	802.474	10,344
Melhor	131.250.000	0	7.732.438	303.272	15,571
Pior	389.327.000	253,5	1.695.635	941.168	6,919
Desvio	53.336.308	74,7	608.461	70.667	1,104

Fonte: a autora, 2021

A queda nos impactos dos eventos no caso de redesenho gerou soluções mais variadas do que o caso de projeto inicial de rede de suprimentos. Neste caso, houve soluções em que o arranjo inicial foi mantido e soluções em que foi decidido abrir um novo armazém, especificamente o W5. Em ambos os casos é possível observar que não há valores negativos para os lucros, mostrando o quão influente é o impacto de eventos disruptivos na lucratividade da rede.

Comparando estes resultados com os obtidos ao considerar maiores impactos causados pelos eventos, é possível perceber que o lucro apresenta melhora considerável nos resultados e

que a resiliência também apresenta resultados melhores, assim como foi observado no caso de projeto de rede inicial, os menores impactos dos eventos disruptivos afetam de forma demasiadamente positiva esses dois objetivos, ao mesmo tempo que o impacto ambiental alcança piores resultados. Já os objetivos investimento e social apresentam melhora, mas muito pequena, em seus resultados.

6 CONCLUSÕES

Diante da complexidade dos temas abordados, a tomada de decisão é extremamente complicada, visto que muitas variáveis estão envolvidas e mais de um objetivo foi considerado na otimização. Diante disso, a análise racional e estruturada sem a ajuda de uma ferramenta capaz de analisar as múltiplas opções de alternativas disponíveis era humanamente impossível. Devido ao caráter multiobjetivo do problema, o algoritmo genético multiobjetivo foi proposto para encontrar soluções para esse problema, possibilitando o estudo das alternativas de ação com o intuito de preparar a CS para reagir a cenários disruptivos.

Este trabalho empregou os conceitos de resiliência e sustentabilidade correspondem à uma forma de lidar com a urgência da sociedade em lidar com as suas necessidades de uma maneira sustentável, garantindo que as próximas gerações poderão desfrutar de boa qualidade de vida. Tais visões buscam atender demandas tanto atuais, visto que há pessoas que já sofrem com os efeitos negativos causados pela operação das empresas agora, e de longo prazo. Como destacado por Bouchery *et al.* (2017), o impacto das ações de hoje só será completamente entendido no futuro, portanto o que deve ser feito é trilhar um caminho em direção à sustentabilidade. Adicionalmente, uma forma de mensurar o pilar social da sustentabilidade foi proposto, trazendo contribuições para a literatura, que em sua maioria trata esse aspecto de forma insuficiente (GOLD e SCHLEPER, 2017).

Além disso, as cadeias de suprimentos sofrem impactos oriundos de diversas fontes, e com o processo de globalização, acontecimentos de uma parte do mundo pode causar efeitos em qualquer lugar do planeta. Em um cenário tão incerto, torna-se necessária a abordagem de resiliência para lidar com eventos perturbadores utilizando estratégias cabíveis para conseguir realizar as operações da melhor forma possível, seja na etapa projeto inicial da rede de suprimentos ou na tomada de decisão sobre a estrutura de uma rede já existente. E neste trabalho, foram consideradas as três capacidades da resiliência na modelagem, ao contrário de muitos trabalhos em que apenas uma ou duas das capacidades eram inseridas na análise.

Como resultado da aplicação do modelo, foram obtidas distintas configurações de arranjos para o caso de projeto inicial como para o caso de redesenho. Nesses diferentes contextos, foram obtidos diversos arranjos de rede dentre as soluções das obtidas pelo modelo em cada caso, e ao se desconsiderar as funções uma de cada vez, foi possível obter resultados mais interessantes para os objetivos remanescentes e mais configurações de rede foram obtidas nas soluções.

Ao analisar essas duas diferentes situações, bem como o caso em que já havia duas manufaturas instaladas e devia ser decidido quais armazéns abrir, é possível obter diferentes configurações nas soluções geradas por cada caso. Isso mostrou que o modelo foi capaz de responder às diferentes problemáticas propostas.

Outra observação importante é relacionada aos parâmetros do problema, pois ao se modificar os impactos causados por eventos perturbadores e os custos de construção de instalações, outras combinações de redes de suprimentos foram sugeridas, mostrando que o problema pode mudar bastante de acordo com os dados da situação analisada. Diante tais informações, fica mais evidente a complexidade da tomada de decisão, assim como a necessidade de se utilizar ferramentas como o modelo proposto para decidir o que deve ser feito.

Com tantos desafios e incertezas, a abordagem de Projeto de Cadeia de Suprimentos foi utilizada de forma a incorporar essas preocupações presentes, e futuras, da sociedade, e este trabalho propôs abrangê-las em uma aplicação de um tão sensível como o de suprimento de alimentos. Como sugestões de próximos passos, outras heurísticas, como PSO (*Particle Swarm Optimization)*, NSGA-II e NSGA-III *(Nondominated Sorting Genetic Algorithm)* e ACO (*Ant Colony Optimization*), podem ser utilizadas para resolver a modelagem proposta. E referente à mensuração dos objetivos, principalmente os relativos à sustentabilidade, novas variáveis podem ser consideradas, como novas tecnologias menos poluentes e fontes de energia renováveis. Além disso, com a ocorrência da pandemia, o debate sobre impacto social na saúde pública pode ser uma dimensão nova a ser considerada.

REFERÊNCIAS

AHI, P.; SEARCY, C. A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production,** 2013.

ALMEIDA, A.; CAVALCANTE, C.; ALENCAR, M.; FERREIRA, R.; ALMEIDA-FILHO, A.; GARCEZ, T. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis**. New York: Springer, 2015.

ALTIPARMAK, F.; MITSUO, G.; LIN, L.; KARAOGLAN, I. A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design. **Computers & Industrial Engineering**, v. 56, n. 2, p. 521-537, 2009.

ALTIPARMAK, F.; MITSUO, G.; LIN, L.; TURAN, P. A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain Networks. **Computers & industrial engineering**, v. 51, n. 1, p. 196-215, 2006.

ANSARI, Z.; KANT, R. A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2524-2543, 2017.

AUGUSTIN, M.; RILEY, M.; STOCKMANN, R.; BENNETT, L.; KAHL, A.; LOCKETT, T., COBIAC, L. Role of food processing in food and nutrition security. **Trends in Food Science & Technology**, v. 56, p. 115-125, 2016.

AVEN, T. On some recent definitions and analysis frameworks for risk, vulnerability, and resilience. **Risk Analysis**, v. 31, n. 4, p. 515-522, 2011.

BATOR, F. The anatomy of market failure. **The quarterly journal of economics**, v. 72, n. 3, p. 351-379, 1958.

BENJAAFAR, S.; LI, Y.; DASKIN, M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models. **IEEE transactions on automation science and engineering**, v. 10, n. 1, p. 99-116, 2012.

BOUCHERY, Y.; CORBETT, C.; FRANSOO, J. C.; TAN, T. (Ed.).**Sustainable supply chains: A research-based textbook on operations and strategy**. Springer, 2016.
BRADLEY, J. An improved method for managing catastrophic supply chain disruptions. **Business Horizons**, v. 57, p. 483–95, 2014.

CENTRAL STATISTICS OFFICE. Disponível em: https://statbank.cso.ie/px/pxeirestat/Database/eirestat/Labour%20Force%20Survey%20Quarterly%20Series/Labour%20Force%20Survey%20Quarterly%20Series_statbank.asp?sp=Labour%20Force%20Survey%20Quarterly%20Series&Planguage=0&ProductID=DB_QLF. Acesso em: 25 jun. 2020

COELLO, C.; COELLO, G.; VAN VELDHUIZEN, D. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. New York: Springer, 2007.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Estratégia, Planejamento e Operação**. Prentice Hall, 2003

CHRISTOPHER, M.; PECK, H. Cranfield S of M. Building the Resilient Supply Chain. **The International Journal of Logistics Management**,15:1–14, 2004.

CLAIR, T.; HINDAR, A. Liming for the mitigation of acid rain effects in freshwaters: a review of recent results. **Environmental Reviews**, v. 13, n. 3, p. 91-128, 2005

D'AMATO, C.; TORRES, J.; MALM, O. DDT (dicloro difenil tricloroetano): toxicidade e contaminação ambiental-uma revisão. **Quim. Nova**, p. 995-1002, 2002.

DEVIKA, K.; JAFARIAN, A.; NOURBAKHSH, V. Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. **European Journal of Operational Research**, v. 235, n. 3, p. 594-615, 2014.
DIABAT, A.; AL-SALEM, M. An integrated supply chain problem with environmental considerations. **International Journal of Production Economics**, v. 164, p. 330-338, 2015.

DELBOURG, E.; DINAR, S. The globalization of virtual water flows: Explaining trade patterns of a scarce resource. World Development, v. 131, p. 104917, 2020.

FONTELLES, M.J.; SIMÕES, M.G.; FARIAS, S.H.; FONTELLES, R.G.S. Metodologia da pesquisa científica: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. **Revista Paraense de Medicina**, 23(3): 1-8, 2009.

FRANCIS, R.; BEKERA, B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. **Reliability Engineering and System Safety,** 2014;121:90–103.

GUIMARÃES, M.; ARAUJO, H.; LUCAS, T.; MOURA, M.; LINS, I. An NLP and Text Mining–based approach to categorize occupational acidents. *In*: European Safety and Reliability Conference (ESREL), Veneza, Itália, 2020.

GOLD, S.; SCHLEPER, M. A pathway towards true sustainability: A recognition foundation of sustainable supply chain management, **European Management Journal**, 35 (4), 425-429, 2017.

HALDURAI, L.; MADHUBALA, T.; RAJALAKSHMI, R. A study on genetic algorithm and its applications. **International Journal of Computer Sciences and Engineering**, v. 4, n. 10, p. 2347-2693, 2016.

HANBURY, M. Photos of empty shelves, long lines at grocery stores around the world reveal real panic as the spread of coronavirus intensifies. Business insider. Disponível em: http://www.businessinsider.com/coronavirus-panic-empty-shelves- long-lines-at-grocery-stores-2020-3. Acesso em: 11, setembro, 2020.

HASAN, H.; RAZALI, S.; MUHAMMAD, N.; AHMAD, A. Research Trends of Hydrological Drought: A Systematic Review. **Water**, v. 11, n. 11, p. 2252, 2019.

HECKMANN, I.; COMES, T.; NICKEL, S. A critical review on supply chain risk–Definition, measure and modeling. **Omega**, v. 52, p. 119-132, 2015.

HENRY, D.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. **Reliability Engineering and System Safety,**99:114–22, 2012.

HOLLAND, J. H. Genetic algorithms. **Scientific american**, v. 267, n. 1, p. 66-73, 1992.

KHAN, S; PEREZ, A. Eventwatch® 2018 Annual Report, Resilinc. 2019.

KHANNA, A. Impact of Migration of Labour Force due to Global COVID-19 Pandemic with Reference to India. **Journal of Health Management**, v. 22, n. 2, p. 181-191, 2020.

LI, H.; PEDRIELLI, G.; LEE, L.; CHEW, E. Enhancement of supply chain resilience through inter-echelon information sharing. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, v. 29, n. 2, p. 260-285, 2017.

LINS, I.; DROGUETT, E. Redundancy allocation problems considering systems with imperfect repairs using multi-objective genetic algorithms and discrete event simulation. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 19:362–81, 2011.

LIU, L.; ZHANG, M.; BUYYA, R.; FAN, Q. Deadline-constrained coevolutionary genetic algorithm for scientific workflow scheduling in cloud computing. **Concurrency and Computation: Practice and Experience**, v. 29, n. 5, p. e3942, 2017.

LUCAS, T.; GUIMARÃES, M.; ARAUJO, H.; MOURA, M.; LINS, I. Uma abordagem biobjetivo para definir rotas de escoamento de minério de ferro. In: LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, João Pessoa, Brasil, 2020.

MARI, S.; LEE, Y.; MEMON, M. Sustainable and resilient garment supply chain network design with fuzzy multi-objectives under uncertainty. **Sustainability**, v. 8, n. 10, p. 1038, 2016.

MARTIRE, S.; TUOMASJUKKA, D.; LINDNER, M.; FITZGERALD, J.; CASTELLANI, V. Sustainability impact assessment for local energy supplies' development–The case of the alpine area of Lake Como, Italy. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, p. 60-76, 2015.

MEKONNEN, M.; HOEKSTRA, A. Four billion people facing severe water scarcity. **Science advances**, v. 2, n. 2, p. e1500323, 2016.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms+ data structures= evolution programs**. Springer Science & Business Media, 2013.

MIRET, C.; CHAZARA, P.; MONTASTRUC, L.; NEGNY, S.; DOMENECH, S. Design of bioethanol green supply chain: Comparison between first and second generation biomass

concerning economic, environmental and social criteria. **Computers & Chemical Engineering**, v. 85, p. 16-35, 2016.

MISHRA, K.; HARIT, S. A fast algorithm for finding the non dominated set in multi objective optimization. **International Journal of Computer Applications**, v. 1, n. 25, p. 35-39, 2010.

NOORAIE, V.; PARAST, M. A multi-objective approach to supply chain risk management: Integrating visibility with supply and demand risk. **International Journal of Production Economics**, v. 161, p. 192-200, 2015.

PATRINLEY, J.; BERKOWITZ, S.; ZAKRIA, D.; TOTTEN, D.; KURTULUS, M.; DROLET, B. Lessons from Operations Management to Combat the COVID-19 Pandemic. **Journal of Medical Systems**, v. 44, n. 7, p. 1-2, 2020.

PECK, H. Understanding the sources and drivers of supply chain risk. **The financial times handbook of management**, v. 3, 2004.

QUEIROZ, M.; IVANOV, D.; DOLGUI, A.; WAMBA, S. Impacts of epidemic outbreaks on supply chains: mapping a research agenda amid the COVID-19 pandemic through a structured literature review. **Annals of Operations Research**, p. 1-38, 2020.

SAEIDIAN, B.; MESGARI, S.; GHODOUSI, M. Evaluation and comparison of Genetic Algorithm and Bees Algorithm for location-allocation of earthquake relief centers. **International Journal of Disaster Risk Reduction**. DOI:15.10.1016/j.ijdrr.2016.01.002. 2016.

SAGE, G. Justice do it! The Nike transnational advocacy network: Organization, collective actions, and outcomes. **Sociology of Sport Journal**, v. 16, n. 3, p. 206-235, 1999.

SERIC, A.; GÖRG, H.; MÖSLE, S.; WINDISCH, Ml. Managing COVID-19: How the pandemic disrupts global value chains. UNIDO Industrial Analytics Platform. Disponível em: https://iap.unido.org/articles/ managing-covid-19-how-pandemic-disrupts-global-value-chains. Acesso em: 15 de setembro de 2020.

SEURING, S.; MULLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v.16, p. 1699-1710. 2008.

SHEFFI, Y.; RICE, J. A supply chain view of the resilient enterprise. **MIT Sloan Management Review**, 47, 41-48**.** 2005.

SONG, M.; XIE, Q. How does green talent influence China's economic growth? **International Journal of Manpower**, 2019.

SOLOMON, S. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. **Reviews of Geophysics**, v. 37, n. 3, p. 275-316, 1999.

TAYLOR, P. In the market but not of it: Fair trade coffee and forest stewardship council certification as market-based social change. **World development**, v. 33, n. 1, p. 129-147, 2005.

TÜRKAY, M.; SARAÇOĞLU, Ö.; ARSLAN, M. Sustainability in supply chain management: Aggregate planning from sustainability perspective. **PloS one**, v. 11, n. 1, p. e0147502, 2016.

VUGRIN, E.; TURNQUIST, M. Design for Resilience in Infrastructure Distribution Networks. **SANDIA REPORT: SAND2012**, v. 6050, p. 39, 2012.

WANG, F.; LAI, X.; SHI, N. A multi-objective optimization for green supply chain network design. **Decision support systems**, v. 51, n. 2, p. 262-269, 2011.

WCED. **WCoEaD, our common future**. Melbourne, Oxford University Press. 1987.

WILLIS, R.; FINNEY, B. A. **Environmental systems engineering and economics**. Springer Science & Business Media, 2012.

WINE, M. Climatization of environmental degradation: a widespread challenge to the integrity of earth science. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 6, p. 867-883, 2020.

XIE, G. Cooperative strategies for sustainability in a decentralized supply chain with competing suppliers. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 807-821, 2016.

YU, H.; WANG, H.; LI, B. Production system innovation to ensure raw milk safety in small holder economies: the case of dairy complex in China. **Agricultural economics**, v. 49, n. 6, p. 787-797, 2018.

ZHANG, Q.; SHAH, N.; WASSICK, J.; HELLING, R.; VAN EGERSCHOT, P. Sustainable supply chain optimisation: An industrial case study. **Computers & Industrial Engineering**, v. 74, p. 68-83, 2014.

ZHOU, L.; LIN, Y., WANG, X.; ZHOU, F. Model and algorithm for bilevel multisized terminal location-routing problem for the last mile delivery. **International Transactions in Operational Research**, v. 26, n. 1, p. 131-156, 2017.