

DECISÃO DE NACIONALIZAÇÃO DE COMPONENTES AERONÁUTICOS COM DINÂMICA DE SISTEMAS

Manoel Roman Filho* E-mail: mroman@fatec.sp.gov.br

Irineu de Brito Junior** E-mail: irineu.brito@unesp.br

Anderson Correia*** E-mail: correia@ita.br

Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki**** E-mail: hugo@usp.br

*Faculdade de Tecnologia Prof. Jessen Vidal (Fatec SJC), São José dos Campos, SP

**Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), São José dos Campos, SP

***Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, São Paulo, SP

****Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP

Resumo: Dentre as características da indústria aeronáutica estão o baixo giro e os elevados níveis de estoques nas etapas da cadeia de suprimentos. Neste trabalho é analisada a decisão de transferência do local de fabricação de componentes utilizados para a produção de aeronaves, por meio da quantificação dos custos de estoques de materiais em cenários que consideram as interações entre os modos de transporte, o regime de liberação aduaneira e os níveis de estoques. O método empregado é a modelagem através da Dinâmica de Sistemas, que proporciona a verificação de causa-efeito das variáveis com comportamento dinâmico, além da compreensão de como essas podem afetar o resultado do sistema. Os resultados mostram como os custos de estoques e transportes viabilizam a transferência da produção dos segmentos importados para o país, através de uma significativa redução nesses custos durante o ciclo de vida previsto para o produto.

Palavras chave: Dinâmica de Sistemas. Logística Internacional. Estoques. Nacionalização. Indústria Aeronáutica.

Abstract: Some characteristics of the aircraft industry are the low turnover and the high levels of inventory in the supply chain. In this article, the decision to transfer the manufacturing plant of parts used in the assembly of aircraft is analyzed, by an analysis of inventory in scenarios that evaluate the interactions among transports modals, customs clearance regime and the inventory levels. The method is modeling through Systems Dynamics by checking cause-and-effect variables with dynamic behavior, it also helps to understand how they can affect the system's result. The results show how the costs of inventories and transportation can influence the decision to transfer the production of the imported segments to the country, providing a significant reduction in the costs of inventories during the expected life cycle of the product.

Keywords: Systems Dynamics. International logistics. Inventory. Nationalization. Aircraft industry.

1 INTRODUÇÃO

A importância estratégica da análise dos *trade-offs* entre as decisões de estocagem e a necessidade de materiais, assim como entre a gestão dos estoques e a coordenação das políticas de transportes e de escolha de modal, possuem um

impacto significativo no nível de serviço proporcionado ao cliente e nos custos logísticos totais de uma cadeia de suprimentos (BALLOU, 2006).

Nesses aspectos, a localização distante dos fornecedores e clientes que, em sua maioria, estão situados na América do Norte e na Europa, passa a ser uma desvantagem competitiva para a Indústria Aeronáutica brasileira em relação aos seus concorrentes que estão situados nesses continentes.

Para suprir essa dificuldade, proporcionada pela questão geográfica e pelas condições operacionais inerentes a países em desenvolvimento (NAGHIZADEH *et al.*, 2017), dentre essas, o processo de importação, que aumenta os *lead times* de suprimentos, uma das estratégias adotadas é a utilização de um elevado nível de estoque (FINAN, 1993; BRITO JUNIOR; FAVERO; YOSHIZAKI, 2012) para garantir a segurança de suas operações de manufatura e os compromissos de entregas. Esses elevados *lead times* conflitam com as necessidades das empresas de transporte aéreo (clientes) que precisam adequar sua frota ao crescimento ou retração do mercado rapidamente. Este conflito ocasiona antecipações e eventuais cancelamentos de pedidos (WELLS, 1984; VERTESY; SZIRMAI, 2010).

Além desses fatores, a cadeia de suprimentos deste setor industrial possui uma complexidade inerente à suas atividades como, por exemplo, um produto composto por dezenas de milhares de itens (uma aeronave Boeing 747 possui mais de 6 milhões de componentes) (MOGHADDAM *et al.*, 2012); alto ciclo de aquisição dos materiais, com origens em quase todos os continentes; alto valor agregado do produto final e dos componentes; alta responsabilidade civil; e elevadas multas por atraso de entrega. Essas características também proporcionam um alto valor em estoque nos elos da cadeia logística e do processo produtivo e conseqüente baixo giro de estoque quando comparado com os outros setores industriais (BRITO JUNIOR; FAVERO; YOSHIZAKI, 2012).

Nesse contexto, o artigo apresenta um estudo de caso com o objetivo de analisar a influência dos principais custos logísticos (estoques e transportes) que incidem na importação de componentes fornecidos por quatro parceiros da cadeia de suprimentos de uma família de jatos regionais, nos seguintes pontos: trânsito; fábrica; e no processo produtivo, através da combinação de localização fabril dos parceiros e diferentes modos de transportes e regimes aduaneiros.

Para a realização dessa análise, a metodologia selecionada foi a Dinâmica de Sistemas por determinar o comportamento dinâmico de um sistema baseado no princípio de ação, causa e efeito, ocorrida quando os fluxos (causa e ação) se acumulam em estoques (efeito). É realizada a modelagem dos fluxos de importação de suprimentos e dos respectivos níveis de estoque, a partir da diferenciação de parâmetros referentes aos principais componentes dos custos logísticos (escolha modal; localização dos fornecedores; e regime aduaneiro). Cenários são propostos e os custos totais de suprimento analisados.

Apesar de estratégico e influenciar diretamente a competitividade da empresa aeronáutica (DOSTALER, 2013), o assunto e o método são pouco abordados na literatura. Artigos recentes são escassos e abordam, principalmente, as operadoras de transporte aéreo e não os fabricantes de equipamentos. Nesse aspecto, este artigo, a partir da abordagem através da Dinâmica de Sistemas, contribui para o entendimento de fatores que proporcionam impactos nos principais componentes dos custos logísticos dos fabricantes de produtos voltados à exportação, mediante uma avaliação da localização dos parceiros e o comportamento dos estoques e dos *lead times*, influenciados pelos regimes aduaneiros. Também propõe alternativas de fabricação (como a nacionalização ou não de componentes) que promovam a redução desses custos.

2 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA

2.1 Modelos em Dinâmica de Sistemas

No processo de modelagem em Dinâmica de Sistemas, Sterman (2000) caracteriza a definição dinâmica do problema ou modo de referência como um padrão de comportamento ao longo do tempo dos principais conceitos e variáveis que compõem o problema. Sua elaboração e compreensão são fundamentais para o estabelecimento de políticas que possam solucioná-lo.

Duas formas de modelagem são empregadas para caracterizar um modelo em Dinâmica de Sistemas: a abordagem *SOFT*, que utiliza os modelos qualitativos (SENGE, 2000); e a abordagem *HARD*, que utiliza os modelos quantitativos, desenvolvidos por Jay Forrester (1961).

Forrester (1961) afirma que somente a modelagem *SOFT* é incapaz de prover um entendimento amplo do comportamento de um sistema complexo e que é através da simulação que se pode verificar o comportamento do sistema em modelagem. A maioria dos profissionais reconhece que ambas as abordagens não são excludentes, uma vez que um modelo qualitativo pode ser utilizado na fase inicial para conceituar e definir um problema, enquanto um modelo quantitativo pode ser empregado nos estágios posteriores.

Maani e Cavana (2000) mostram as principais diferenças entre as abordagens *SOFT* e *HARD* sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais diferenças entre as modelagens *SOFT* e *HARD*

	HARD	SOFT
Definição do Modelo	Uma representação da realidade.	Um método para gerar debates e insights sobre a realidade
Definição do problema	Uma única e bem definida dimensão (objetivo específico).	Múltiplas dimensões (objetivos diversos)
Agentes / Organizações	Não são levados em consideração.	Partes integrantes do modelo.
Dados / Informações	Quantitativos.	Qualitativos.
Objetivos	Soluções e otimizações.	<i>Insights</i> e aprendizagem.
Resultados	Produtos ou recomendações.	Aprendizado em grupo ou autodesenvolvimento.

Fonte: Adaptado de Maani e Cavana (2000).

2.2 A abordagem *SOFT* e o Diagrama de Enlace Causal

A Modelagem *SOFT* resulta em uma visualização de qualquer sistema, pela identificação das suas características estruturais, das relações de causa-efeito-causa e dos tempos de espera (*delays* ou atrasos) presentes no comportamento dos sistemas. Essa atividade utiliza a técnica dos chamados Diagramas de Enlace Causal (ou, *Causal Loop Diagrams - CLD*), Diagramas de Influência, Diagramas de *Feedback*, ou ainda Diagramas de *Loop*. Esses diagramas, de natureza qualitativa, são estruturas em forma de grafos que apresentam ordenadamente as variáveis do modelo e, principalmente, as relações de causa e efeito entre elas; apresentam também o comportamento de um sistema de retroalimentação (ou, *feedback systems*). Um CLD é constituído por variáveis conectadas (*links* causais), ligações, *loops*, defasagem, níveis e fluxos que representam as relações de causa e efeito entre as variáveis. Os *loops* de feedback positivo, denominados de reforço, geram crescimento, amplificam as variações e reforçam mudança. *Loops* negativos,

denominados de equilíbrio, como a própria nomenclatura define, atuam para trazer o sistema a um estado linear, o equilíbrio (SENGE, 2000).

O primeiro passo para determinar um diagrama causal e representá-lo como um modelo de simulação em Dinâmica de Sistemas é a identificação de Níveis e Fluxos (SENGE, 2000).

2.3 A modelagem HARD – Diagrama de Forrester

O desenvolvimento de Modelos HARD, da Dinâmica de Sistemas, está baseado na compreensão de dois conceitos: estoques (ou níveis) e fluxos. Estoques (níveis) são variáveis que representam acumulações de recursos ao longo do tempo, isto é, representam o estado de um recurso, como, por exemplo: pedidos em carteira, mão de obra, inventários, capital intelectual, dentre outros. Fluxos são variáveis que representam os movimentos, taxas ou atividades que fazem com que os estoques se elevem, caiam ou permanecem constantes. Forrester (1961) denomina de “políticas” a forma pela qual os fluxos são gerenciados.

2.4 Modelos de Dinâmica de Sistemas utilizados para análise nas indústrias aeronáutica e de transporte aéreo

Tako e Robinson (2012) elaboraram uma revisão de literatura para análise de métodos de simulação utilizados em logística e cadeia de suprimentos. Apontam e recomendam a utilização de Dinâmica de Sistemas em questões estratégicas e análise de políticas, principalmente, por capturar os efeitos a longo prazo das decisões, bem como, as interações entre as decisões tomadas e os diferentes setores da empresa e da sociedade. Destacam, como vantagem, a menor quantidade de informações necessárias para elaboração de modelos.

2.5 Modelos para estimação de mercado e demanda

Segundo Pierson e Sterman (2013), a indústria aeronáutica possui sua demanda diretamente afetada pela indústria de transporte aéreo. Avaliaram esse comportamento através de um modelo de Dinâmica de Sistemas, Cadeias de Markov e simulação de Monte Carlo para analisar como a rapidez com que os fabricantes de aeronaves são capazes de atender a demanda das empresas de

transporte aéreo influenciam a rentabilidade dessas empresas. Concluem que quanto mais rápido os fabricantes conseguem responder às necessidades de mercado, maior a lucratividade das empresas de transporte aéreo. Todavia, enquanto o transporte aéreo é uma indústria cíclica altamente sensível a flutuações na economia o que requer respostas rápidas ao crescimento ou retração do mercado (WELLS, 1984), a indústria aeronáutica possui *lead times* e ciclos de entrega muito longos, chegando a um ano em componentes de propulsão. Esse conflito entre resposta rápida e *lead time* elevado exige uma antecipação de demanda e, conseqüentemente, de compras por parte das companhias aéreas, e também dos fabricantes, em relação a seus fornecedores e é um dos fatores que contribuem para uma elevada carteira de pedidos (quando comparada com outros setores industriais) e o aumento de estoques na indústria aeronáutica (BRITO JUNIOR; FAVERO; YOSHIZAKI; 2012).

Lyneis (2000) avaliou os ciclos do mercado que os fabricantes de aeronaves atuam e indica a utilização de modelos de Dinâmica de Sistemas como um meio para entender as causas do comportamento da indústria e, assim, estabelecer cenários razoáveis para decisões sobre políticas de relacionamentos com fornecedores.

Mack, Jiang e Peterson (2013), em um artigo publicado com apoio de um grande fabricante de aeronaves, utilizaram um modelo de Dinâmica de Sistemas para estabelecer um amplo conjunto de considerações e medidas apropriadas para avaliar o equilíbrio entre a oferta e a demanda na indústria de transporte aéreo. Afirmam que a indústria de transporte aéreo é influenciada por fatores socioeconômicos, geográficos, demográficos, geopolíticos, econômicos (preço do petróleo), sazonais / periódicos, além da competição entre os concorrentes. Esses autores ainda destacam os efeitos dos *lead times*, que possuem elevada incerteza e raramente estão em harmonia entre os participantes da cadeia de suprimentos.

Ghadge *et al.*, (2018) avaliaram o impacto da implementação da manufatura aditiva nas redes da cadeia de suprimentos de peças sobressalentes de uma companhia aérea comercial global líder de mercado. Utilizaram a Dinâmica de Sistemas para comparação e estudo de sistemas de controle e o método permitiu aos tomadores de decisão a visualização sobre o desempenho da Cadeia de Suprimentos no tocante ao equilíbrio dos níveis de estoque em relação a demanda.

Também abordaram as emissões de carbono nas cadeias de suprimentos aeronáuticas.

Moghaddam *et al.* (2012) avaliaram a cadeia de suprimentos de fixadores (macroestrutura Hardware na Figura 1), desenvolvendo um modelo de Dinâmica de Sistemas para avaliar seu comportamento e estabelecer a base para uma análise de faltas, em caso de um crescimento abrupto da demanda. O modelo captura a relação entre parâmetros, como produção dos fabricantes de aeronaves; capacidade do fornecedor; pedidos; atrasos; níveis de estoque; e capacidades. Os resultados mostram faltas de produtos e consequentes paradas de linha de produção, em caso de um aumento súbito de 30% da demanda de fixadores e recomendam a implementação de políticas como o VMI (*Vendor Management Inventory*) para minimização das faltas.

2.6 Modelos para os processos de aquisição e estoques

Lauerwald e Staudacher (2014), por sua vez, comentam a dificuldade no relacionamento das empresas de transporte aéreo com os fabricantes de aeronaves e de componentes de propulsão, e caracteriza a macroestrutura de motores dentro da cadeia de suprimentos aeronáutica como sendo um oligopólio bilateral (fabricantes e motores), que estabelecem as regras nas relações de mercado, o que coloca as empresas de transporte em desvantagem nesse relacionamento. Utilizaram a Dinâmica de Sistemas para elaboração do Jogo do Motor de Aeronaves (*The Aircraft Engine Game*), inspirado no *Beer Game*, e desenvolvido por Forrester (1961); e realizaram uma simulação para um horizonte de 18 anos. Os resultados mostraram que a redução de custos resultantes do desenvolvimento tecnológico de motores é perene para as empresas de transporte aéreo, porém para os fabricantes é temporário, o que requer contínuos investimentos em tecnologia. Yang *et al.* (2016) também utilizam um jogo denominado *People Express Microworld Simulator*, de empresas aéreas baseados na Dinâmica de Sistemas com objetivos didáticos para alunos de MBA executivo. Esse jogo consiste em simular decisões trimestrais de compras de aeronaves em uma empresa de transporte aéreo. O jogo proporciona aprendizagem sobre efeitos não lineares de uma decisão, múltiplos *feedbacks*, *loops*, *time delays*, e os conceitos de estoque e fluxo.

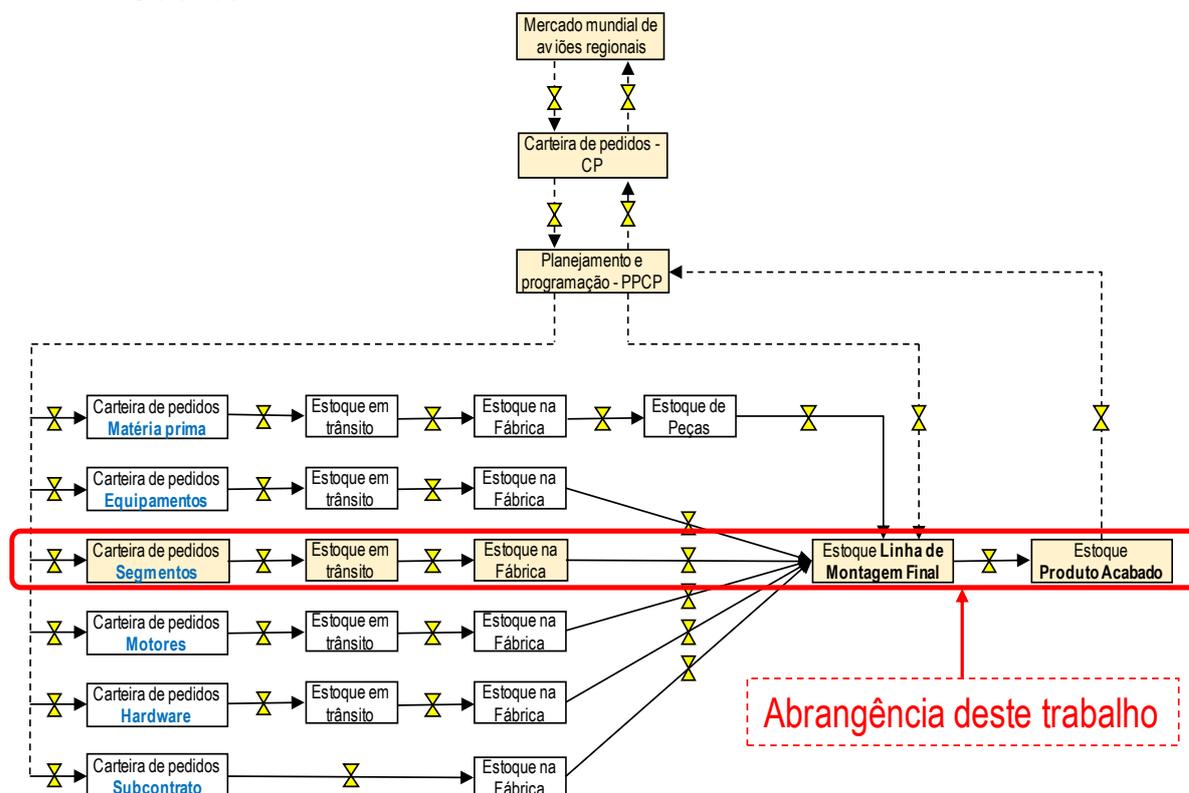
Finan (1993) estudou a dinâmica dos pedidos de uma grande fabricante de aeronaves norte-americana e comenta que, apesar dos altos volumes de estoques, faltas de componentes são frequentes e que tais dificuldades ocorrem também em outros grandes fabricantes de aeronaves. Avaliou todo o ciclo de pedido de segmentos desde a engenharia do produto, plano de manufatura, *lead times*, colocação e monitoramento do pedido. Afirma que o fabricante de aeronaves possui a vantagem, quando comparado aos demais setores do mercado, de possuir uma demanda determinística, devido à carteira de pedidos. Calibrou o modelo através de uma simulação de 4 anos de produção anteriores e comparou os resultados de faltas e níveis de estoque com os valores reais observados (erro final = 3%). Após ajuste no modelo, políticas de estoque, pontos de pedido e ciclos foram alteradas e os resultados avaliados. Conclui que políticas como redução do tamanho do pedido e do *lead time*, assim como ferramentas como *kanban* e *lean manufacturing* são capazes de reduzir em até 65% (melhor caso) os níveis de estoque.

2.7 Apresentação do problema

Na cadeia de suprimentos da família de aeronaves em análise, de uma forma geral, 50% de seus produtos (em relação ao valor) são materiais importados. Desses, 85% possuem origem nos Estados Unidos da América, 10% na Europa e os demais na América Latina e Ásia.

Na macroestrutura de operações dos jatos regionais, utilizadas no desenvolvimento da modelagem em Dinâmica de Sistemas, os materiais podem ser agregados em seis grandes famílias com os principais fluxos e estoques, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Macroestrutura de operações de jatos regionais para modelagem em Dinâmica de Sistemas



Fonte: Autores.

As seis famílias são tipificadas como: (i) matéria prima composta por chapas, placas e materiais forjados, utilizados para usinagem de componentes da aeronave; (ii) equipamentos que se referem a parte de aviônicos, sistemas hidráulicos e pneumáticos; (iii) segmentos são partes da fuselagem, asa, carenagens e superfícies móveis, além do interior da aeronave; (iv) motores compreendem toda a parte de propulsão; (v) hardware é composto por elementos de fixação e montagem, como, por exemplo, parafusos, porcas e rebites; e (vi) subcontrato são empresas fornecedoras que recebem matéria prima e desenho técnico para execução de serviços de usinagem e tratamentos térmico e químico, acabamento superficial e montagem de subconjuntos (BASTOS, 2007).

Uma particularidade do setor aeronáutico é que o desenvolvimento de um projeto de uma nova aeronave requer uma ampla gama de conhecimento tecnológico (NAGHIZADEH *et al.*, 2017) e elevados montantes de investimento. Uma das estratégias adotada pela indústria é estabelecer integração com parceiros de negócios que possuam domínio tecnológico no assunto e assumam parte desse

investimento, agregando conhecimento (PARK; KIM, 2014) e reduzindo, assim, a necessidade de capital (DOSTALER, 2013).

Esses parceiros investem e assumem o risco e os custos de desenvolvimento do componente e alocam mão de obra especializada no desenvolvimento do projeto, participando desde a concepção até a montagem final da aeronave (CAGLI; KECHIDI; LEVY, 2012). O retorno do montante investido ocorre mediante a exclusividade de fornecimento desses componentes durante todo o ciclo de vida do produto (FERREIRA; SALERNO; LOURENÇÃO, 2011).

A abrangência deste artigo analisa o fornecimento dos segmentos dos quatro parceiros da cadeia de suprimentos de uma família de jatos regionais. A escolha desses componentes ocorreu por representarem, aproximadamente, 30% dos custos dos materiais para a composição do produto final e são providos por parceiros de negócios que, contratualmente, fornecem durante todo o ciclo de vida do produto. São eles:

Parceiro 1: localizada na cidade de La Palma, nos Estados Unidos da América;

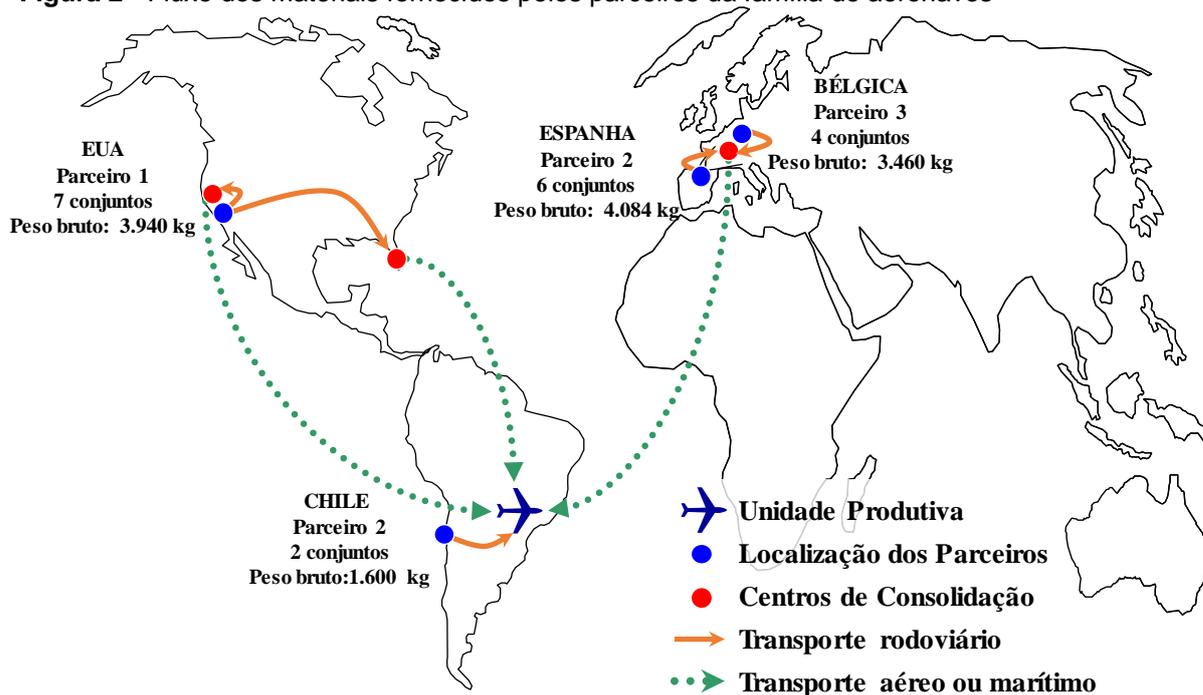
Parceiro 2: localizada na cidade de Vitória, na Espanha;

Parceiro 3: localizada na cidade de Gosselies, na Bélgica;

Parceiro 4: localizada na cidade de Santiago do Chile, no Chile.

Os materiais que integram os quatro segmentos fornecidos pelos parceiros são semiasas, naceles, poltronas e componentes de interior, estabilizadores vertical e horizontal, segmentos de fuselagem, pilones e portas. Esses componentes são caracterizados, principalmente, por elevado volume e baixo peso. A localização dos quatro parceiros (origem); a quantidade de conjuntos fornecidos; o peso bruto; os centros de consolidação dessas cargas (Los Angeles, Miami e Paris); a indicação do modal de transportes utilizados; e a unidade produtiva no Brasil (destino) são mostradas na Figura 2, a seguir.

Figura 2 - Fluxo dos materiais fornecidos pelos parceiros da família de aeronaves



Fonte: Autores.

A análise dos custos logísticos dos materiais anteriormente citados ocorre desde a saída dos componentes na localidade de origem (parceiros), chegada à fábrica (no Brasil) até a montagem final do segmento. Ressalta-se que o produto final é voltado à exportação e não ao mercado interno.

2.8 O desenvolvimento do modelo

Para a montagem do modelo de Dinâmica de Sistemas e de acordo com a fundamentação metodológica inicialmente é elaborado o Diagrama de Enlace Causal (*soft*) e posteriormente o modelo de Dinâmica de Sistemas (*hard*) com a inserção dos dados e parâmetros da modelagem. O modelo é, então, validado através do modo de referência e, após esta etapa, os resultados são analisados.

2.9 Modelo SOFT - Diagrama de Enlace Causal

O Diagrama de Enlace Causal objetiva identificar e visualizar as características estruturais das principais variáveis, bem como as suas relações de causa-efeito e as estruturas de *feedback* que afetam o comportamento do modelo. O

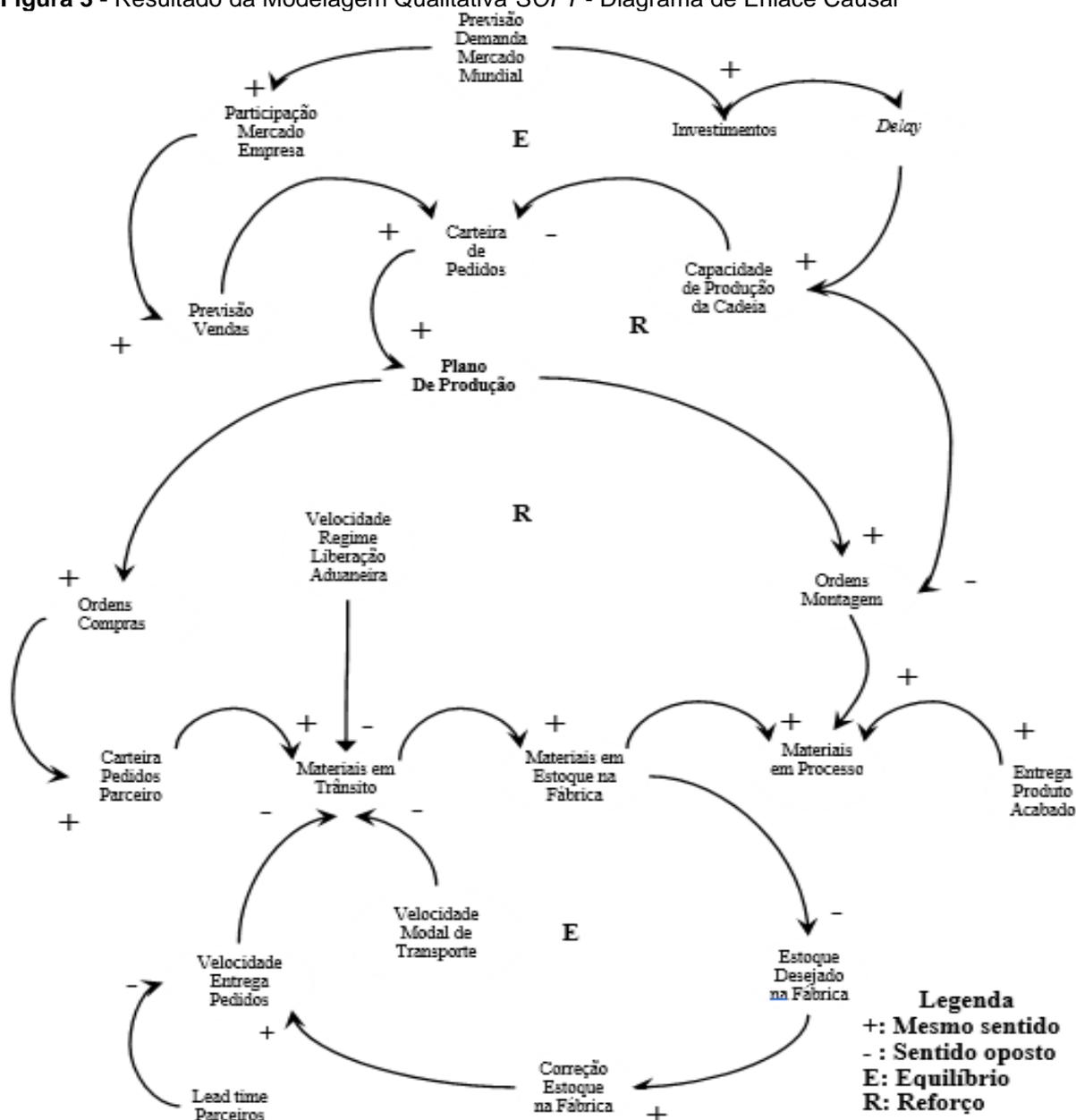
objetivo principal do modelo proposto é o de analisar o valor dos estoques da cadeia de suprimentos de uma empresa do setor aeronáutico, para um grupo de materiais fornecidos pelos parceiros de uma família de jatos regionais.

O modelo inicia-se com a variável exógena, a Previsão de Mercado Mundial (expectativa de vendas), que é cíclica, durante o ciclo de vida da família desse produto, estimado em 18 anos, cujos dados foram divulgados para os acionistas e para o mercado, conforme as normas das sociedades anônimas. A participação no mercado da empresa é uma variável, que, combinada com a variável previsão do mercado mundial, influenciará na formação da sua carteira de pedidos.

Um plano de produção será elaborado para o atendimento dessa carteira, mediante a variável capacidade de produção na cadeia, que não será analisada dentro desse contexto, por não ser o objetivo deste modelo. O plano de produção realizará geração de dois grandes tipos de ordens. A primeira, as ordens de compras para os parceiros, construindo, assim, a formação da sua carteira de pedidos, que estarão enviando seus produtos via sua capacidade de produção na cadeia com os seus respectivos *lead times*. A segunda, as ordens de produção de montagem, que aguardará os *lead times* dos parceiros, os ciclos de transportes e o ciclo de liberação de despacho aduaneiro para serem produzidas e entregues ao cliente final.

As ordens de produção de montagem dependerão da disponibilidade de estoques dos materiais dos parceiros e de uma política de estoque de segurança, denominada estoque desejado na fábrica, que é uma função da previsão de vendas do mês e que efetuará a retroalimentação no parceiro pela variável correção de estoque (antecipa ou posterga entrega). A Figura 3 mostra o modelo *SOFT* - Diagrama de Enlace Causal das principais variáveis:

Figura 3 - Resultado da Modelagem Qualitativa SOFT - Diagrama de Enlace Causal



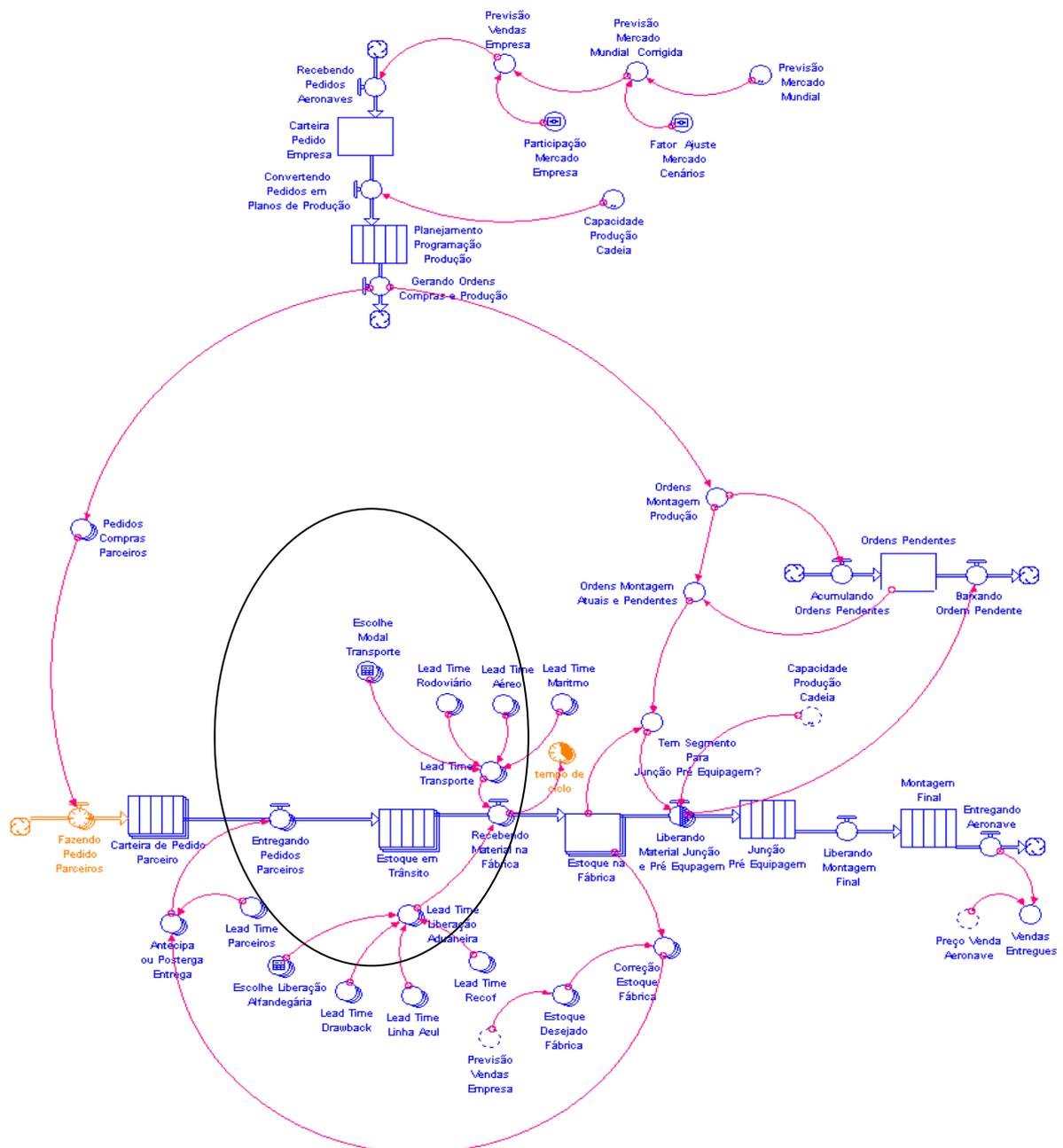
Fonte: Autores.

O diagrama apresentado na Figura 3 permite um entendimento dinâmico de cada agente do processo da cadeia de suprimentos e possibilita o desenvolvimento de cenários onde os valores das variáveis são alterados sistematicamente. A partir do modelo *Soft* desenvolve o modelo *Hard*, como será mostrado a seguir.

2.10 Modelo *HARD* – Diagrama de Forrester

Utilizou-se o software *iThink* da Isee Systems na programação do modelo pela sua grande utilização no mundo profissional e acadêmico, presente na literatura pesquisada, e pela facilidade na operação em sua interface gráfica, permitindo um rápido aprendizado do conceito de Fluxos e Estoques. A Figura 4 mostra o modelo *HARD* desenvolvido.

Figura 4 - Modelo *HARD* desenvolvido para análise dos custos logísticos na cadeia de suprimentos (em destaque as etapas do processo de importação)



Fonte: Elaborado pelos autores a partir do software *iThink*

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 21, n. 4, p. 2068-2092, 2021

2. 11 Dados considerados no modelo

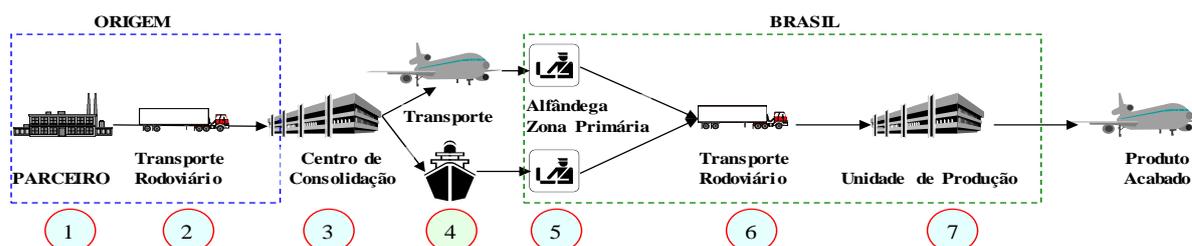
Os dados foram considerados com base em previsões de mercado disponíveis em *website* de um fabricante de aeronaves e em levantamento de campo realizada pelos autores.

- 1- Previsão do mercado mundial: 2.600 aeronaves para os próximos 18 anos.
- 2- Ciclo de vida da família do produto: 18 anos (216 meses).
- 3- Participação do mercado da empresa analisada: 50 % (1.300 aeronaves).
- 4- Preço médio de venda de uma aeronave: US\$ 18.000.000.
- 5- *Lead time* dos parceiros: 6 meses.
- 6- *Lead time* dos modais de transporte internacional:
 - Aéreo para Parceiro 3; Parceiro 2 e Parceiro 1: 0,2 mês.
 - Marítimo para Parceiro 3, Parceiro 2 e Parceiro 1: 1,1 mês.
 - Rodoviário para a Parceiro 4: 0,8 mês.
- 7- *Lead time* de liberação dos regimes aduaneiro:
 - Recof: 0,04 mês.
 - Linha azul: 0,14 mês.
 - *Draw back* e nacionalização dos segmentos: 0,32 mês.
- 8- Intervalo incremental de integração (dt) entre os tempos para o cálculo no modelo de simulação = 0,01 mês e utilizada a integração pelo método de Euler.

2.12 Custos logísticos considerados no modelo

Para apuração dos principais custos logísticos no processo de importação de materiais é necessário conhecer o fluxo dos materiais e os locais de ocorrência. A Figura 5 mostra os direcionadores e locais de ocorrência dos custos.

Figura 5 - Fluxo dos materiais e locais de ocorrência dos custos



Fonte: Adaptado de Brito Jr, Belfiore e Yoshizaki (2012).

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 21, n. 4, p. 2068-2092, 2021

Legenda da figura:

- 1- Origem dos materiais (Los Angeles, Gosselies, Vitória, Santiago).
- 2- Transporte do parceiro ao centro de consolidação.
- 3- Centro de consolidação de cargas.
- 4- Transporte internacional.
- 5- Zona primária no Brasil (porto ou aeroporto) na importação.
- 6- Transporte rodoviário da zona primária até a unidade de produção.
- 7- Unidade de produção no Brasil.

Os custos considerados importantes para o desenvolvimento do modelo são:

- Transporte (Internacional e Nacional):
 - Custos de transporte rodoviário (2), com origem no fornecedor e destino no centro de consolidação de cargas no exterior (Incoterm: Ex Works).
 - Frete aéreo ou marítimo e seguro (4).
 - Custos de desembaraço aduaneiro (5).
 - Movimentação e transporte de materiais em zona aduaneira.
 - Custos de desembaraço alfandegário no aeroporto e no porto de destino.
 - Custos de transporte e seguro com origem na zona primária até o destino.
- Estoque
 - Custo financeiro do estoque em trânsito (*pipeline*): 18% ao ano.

A Tabela 2 mostra o somatório dos custos de transporte internacional e desembaraço aduaneiro utilizados na modelagem deste trabalho:

Tabela 2 - Custos de transporte internacional por unidade

Parceiro	Origem	Peso unitário do conjunto (kg)	Modal Aéreo (US\$)	Modal Marítimo (US\$)	Modal Rodoviário (US\$)
Parceiro 1	E U A La Palma	3.940	51.800	9.663	Não aplicável
Parceiro 2	Espanha Vitória	4.084	65.394	18.517	Não aplicável
Parceiro 3	Bélgica Gosselies	3.460	46.283	11.972	Não aplicável
Parceiro 4	Chile Santiago	1.600	Não aplicável	Não aplicável	2.284

Fonte: Cotação por parte dos autores.

Obs: Os valores dos conjuntos (segmentos) foram intencionalmente omitidos por questões de confidencialidade.

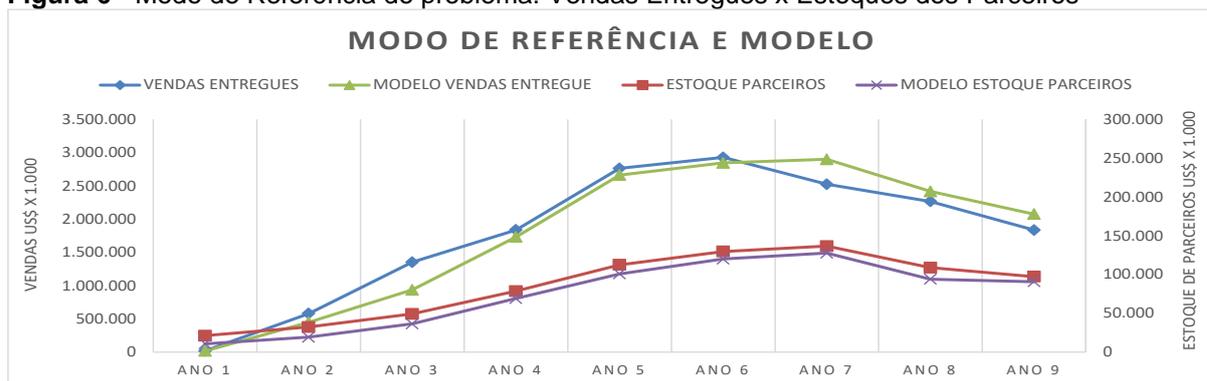
3 RESULTADOS

Os resultados obtidos são apresentados em três partes: a primeira parte compara os valores das variáveis que compõem o modo de referência do problema: vendas entregues e estoque dos segmentos dos parceiros, com os valores dessas mesmas variáveis obtidas pelo modelo desenvolvido e com o objetivo de validar o modelo para analisar as estratégias. A segunda parte analisa os custos acumulados de estoques e transportes, por meio da composição de diferentes cenários, alterando o regime aduaneiro e o modal de transportes. A terceira analisa os custos acumulados de estoques e transportes dos quatro parceiros instalados e produzindo no Brasil.

Parte 1: Validação do Modelo: o Modo de Referência do problema e o modelo desenvolvido

A primeira análise de um resultado em um modelo de Dinâmica de Sistemas é validar o modelo através da verificação do comportamento das variáveis que compõem o Modo de Referência do problema com o comportamento dessas no modelo desenvolvido, utilizando os mesmos parâmetros do problema original (histórico), isso é, verificar se as curvas de resultados apresentadas pelo modelo e o modo de referência possuem a mesma forma (distribuição) no tempo para, então, obter as respostas para as questões propostas neste artigo. Neste trabalho, o Modo de Referência do problema, que é composto pelas variáveis de vendas entregues e o valor dos estoques dos parceiros, é comparado com os valores das vendas entregues e valor dos estoques dos parceiros apresentados pelo modelo e estão mostrados na Figura 6.

Figura 6 - Modo de Referência do problema: Vendas Entregues x Estoques dos Parceiros



Fonte: Autores.

Comparando as variáveis do modo de referência do problema com o obtido pelo modelo desenvolvido, observa-se um mesmo comportamento das curvas. Apesar do erro observado para vendas entregues ter sido de 16,7 %, devido, principalmente, a oscilações de mercado nos anos 3 e 7, o comportamento do modelo foi considerado adequado para analisar e propor soluções para o problema pesquisado neste trabalho.

Parte 2: Análise dos valores de estoques e transportes, por meio da composição de diferentes cenários

Para esta análise, seis cenários foram estabelecidos com base no modal de transporte utilizado e no regime de liberação aduaneiro e estão descritos na Tabela 3. Para o Parceiro 4, localizado no Chile, o modal a ser utilizado no modelo será sempre o rodoviário.

Tabela 3 - Cenários a serem analisados

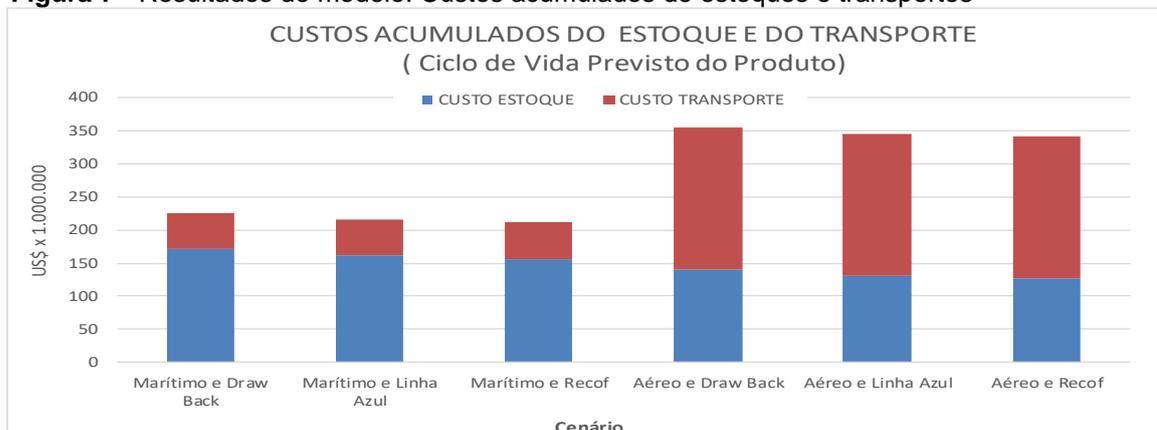
Modal de transporte	Regime aduaneiro	
	Marítimo	Aéreo
	<i>Draw back</i>	Cenário 4
	Linha Azul	Cenário 5
	RECOF	Cenário 6

Fonte: Os autores.

Os resultados desta análise foram obtidos pela execução do modelo desenvolvido utilizando o software *iThink* e são mostrados pela Figura 7 através da combinação de 6 cenários que consideraram uma previsão de vendas no mercado

mundial de 2.600 aeronaves, uma participação de mercado de 50% para a empresa analisada (1.300 aeronaves entregues), *lead times* dos parceiros de seis meses e ciclo de vida do produto de 18 anos (216 meses).

Figura 7 - Resultados do modelo: Custos acumulados de estoques e transportes



Fonte: Autores.

Observa-se que o menor custo logístico acumulado US\$ 211 milhões (US\$ 156 M de estoque e US\$ 55 M de transporte) é obtido com o cenário 3, utilizando o modal de transporte marítimo e o regime de liberação aduaneira RECOF. Observa-se ainda que o menor custo de estoque acumulado (US\$ 126 M) é obtido no cenário 6, com a utilização do regime de liberação aduaneira RECOF e o modal de transporte aéreo (com custo de US\$ 215 M). Portanto, comparando os cenários 3 e 6 observa-se uma redução no custo de estoque de, aproximadamente, US\$ 30 milhões, porém com um aumento significativo no custo de transporte, ocasionado pela utilização do modal aéreo. Deve-se notar, porém que, caso fosse possível uma significativa redução do custo do transporte aéreo, a sua utilização pode ser viável devido ao melhor nível de serviço obtido.

Parte 3: Análise dos custos logísticos – Produção local Nacionalização dos segmentos

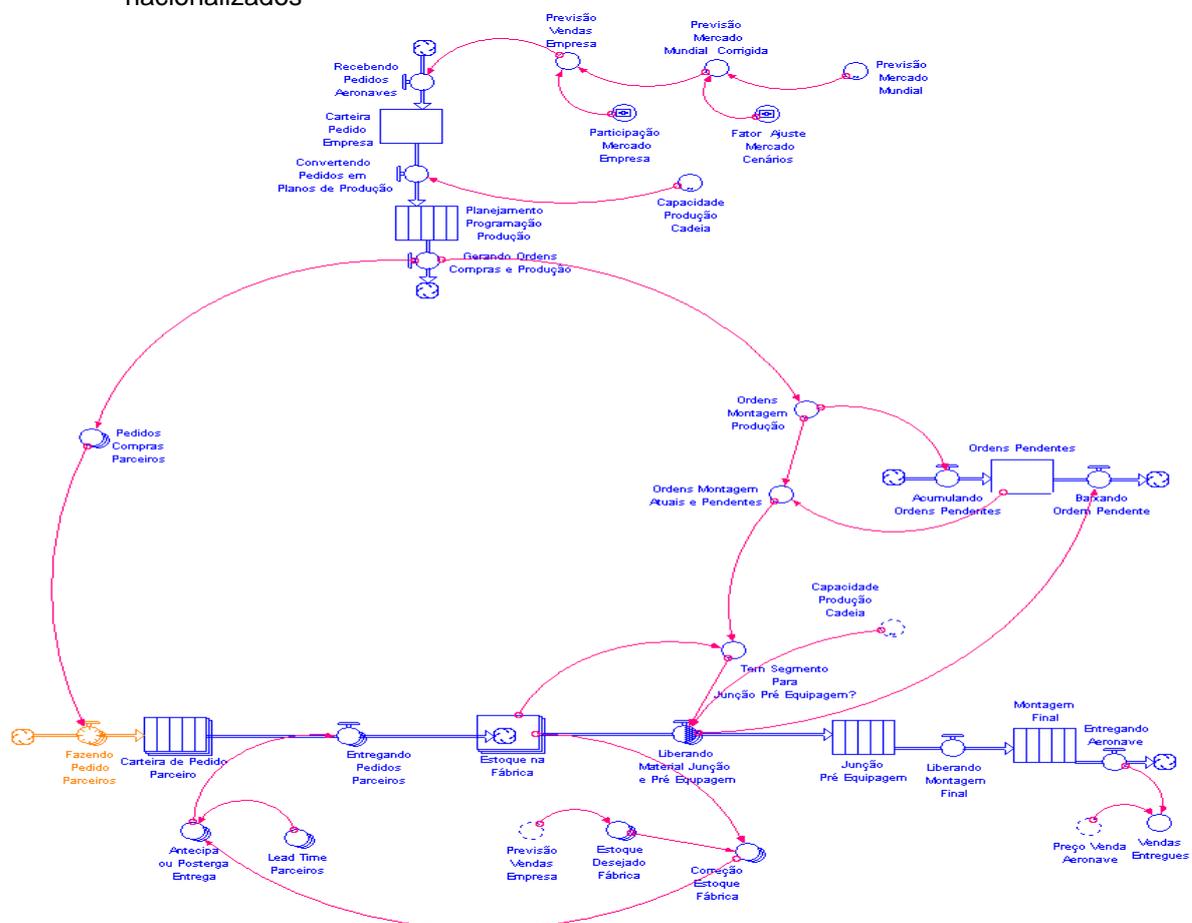
Para esta situação o modelo foi adaptado, considerando que o parceiro instale uma unidade fabril no Brasil para a produção do segmento e opere em conjunto com a montadora sob regime aduaneiro de RECOF Aeronáutico. Para essa situação os parâmetros foram modificados para:

- 1- Valor de frete rodoviário nacional: 0,5% do valor do material transportado (BRITO JR; BELFIORE; YOSHIZAKI, 2012);
- 2- *Lead Time* dos parceiros: 2 meses;
- 3- Estoque de segurança na fábrica: 1 semana em relação ao plano de vendas.

O modelo *HARD* modificado para realizar as análises dos segmentos nacionalizados passa a apresentar a forma da Figura 8 a seguir.

Deve-se observar a diferença dos modelos descritos na Figura 4 - Modelo *HARD*, desenvolvido para análise dos custos logísticos na cadeia de suprimentos e na Figura 8 - Modelo *HARD*, modificado para análise dos custos logísticos dos segmentos de parceiros nacionalizados. Pode-se verificar que foi eliminado do modelo desenvolvido um nível de estoque em trânsito, que é um acumulador de recursos (financeiros e ciclos) no modelo, bem como, as variáveis que compõem o processo de logística internacional.

Figura 8 - Modelo *HARD* modificado para análise dos custos logísticos dos segmentos de parceiros nacionalizados



Fonte: Elaborado pelos autores a partir do software *iThink*.

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 21, n. 4, p. 2068-2092, 2021

O resultado utilizando o modelo *Hard* modificado acima é obtido de forma gráfica foi:

Custo de Estoque Total Acumulado (US\$): 69.815.440.

Custo de Transporte Rodoviário Nacional Total Acumulado (US\$): 18.670.360.

Custo Logístico Total Acumulado (US\$): 88.485.800.

Comparando esses resultados com o menor custo logístico acumulado obtido com o cenário 3 US\$ 211 milhões (US\$ 156 M de estoque e US\$ 55 M de transporte), é possível observar uma grande redução dos custos logísticos no caso de nacionalização dos segmentos, o que justifica uma adoção desse modo de operação por parte do fabricante.

3.1 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi conduzida para variações em quatro parâmetros, citados na Tabela 4 a seguir, foram realizadas e observadas sua influência nos valores e nos custos de estoques.

Tabela 4 - Parâmetros analisados na análise de sensibilidade

Parâmetro	Observação
1-Aumento da capacidade de produção da cadeia em 1 unidade por mês.	Redução insignificante dos valores e dos custos de estoques. Capacidade de produção adequada.
2- Aumento da participação no mercado da empresa de 50 para 60 %.	Aumento significativo dos valores e dos custos dos estoques. Necessidade de aumento da capacidade de produção.
3- Redução do estoque desejado na fábrica de 1,5 para 1,25 vezes a quantidade de vendas previstas.	Reduz de forma significativa os valores e os custos de estoques. Aumenta o risco de falta de materiais na produção.
4- Redução dos <i>lead times</i> dos parceiros de 6 para 5 meses.	Reduz os valores e os custos de estoques. Aumenta o risco de falta de materiais na produção.

Fonte: Os autores.

Outro parâmetro analisado para a situação de nacionalização de segmentos foi um acréscimo no valor do produto. Nesse caso, seria factível considerar que o parceiro solicite um aumento desse tipo, devido implementação de unidade no Brasil e aos custos logísticos de transporte e aduaneiros que passariam a ser responsabilidade desse parceiro. A análise de sensibilidade foi realizada para verificar eventuais incrementos de valores dos segmentos nacionalizados e os

impactos na solução. A Tabela 5, a seguir, mostra valores percentuais desse aumento e o custo total observado.

Tabela 5 - Parâmetros analisados na análise de sensibilidade

Aumento	Custo Total (US\$ x 1.000.000)
100%	176,98
125%	199,09
140%	212,37
150%	221,22
190%	256,61

Fonte: Os autores.

Comparando esses resultados com o menor custo logístico acumulado, em caso de não nacionalização, obtido com o cenário 3 - US\$ 211 milhões - um eventual acréscimo de cerca de 140% no valor do produto seria aceitável e a viabilidade da nacionalização dos segmentos seria mantida.

4 CONCLUSÕES

Neste artigo foi analisado o comportamento dos custos logísticos totais, de forma acumulada, para a tomada de decisão na nacionalização de segmentos fornecidos por parceiros internacionais da indústria aeronáutica brasileira, frente a seis cenários logísticos de materiais importados e um cenário, considerando a nacionalização de materiais. Este artigo ilustra o ganho para a indústria aeronáutica da adoção de um modelo de transferência de produção de seus parceiros internacionais para o Brasil.

Em caso de importação dos segmentos, o menor custo logístico é obtido na utilização do cenário 3 modal marítimo e regime de desembaraço aduaneiro RECOF, porém é observado um elevado valor de estoque na cadeia de suprimento e uma oportunidade para reduzir esses custos. Realizando uma comparação entre essa solução e a nacionalização de materiais é ressaltada uma diferença significativa (US\$ 156 M) entre os custos logísticos acumulados dos segmentos fornecidos através do modal marítimo com os custos logísticos acumulados dos segmentos nacionalizados. Isso representa um valor considerável de economia para disponibilizar investimentos em outras atividades da empresa, além melhorar o nível de serviço da indústria aeronáutica. A análise de sensibilidade mostrou que, mesmo com eventuais aumentos de até 140% no valor dos componentes, devido aos custos

logísticos assumidos pelos fornecedores decorrentes da nacionalização, a solução ainda se manteve viável.

O melhor resultado obtido, através do regime de desembaraço aduaneiro RECOF, reforça o conceito de que políticas públicas que visam proporcionar agilidade no desembaraço aduaneiro e redução de estoques e custos financeiros proporcionam ganhos de competitividade e ampliação de parques fabris no país.

É importante observar que os resultados obtidos com a redução de estoques na cadeia de suprimentos pesquisada são de apenas um grupo de materiais de uma família de jatos e que representa cerca de 30 % dos custos desse produto. Esses resultados teriam uma ampliação ainda maior se aplicado para outros grupos de materiais dessa família de produtos (motores, aviônicos etc.), como também para outras famílias de jatos.

Outro aspecto a ser considerado na decisão de nacionalização são ganhos não mensurados neste trabalho como a redução de *lead times* de transporte devido à proximidade dos fornecedores proporcionando agilidade de resposta a mudanças de programação de produção e oscilações de mercado, assim como o impacto na economia da região através da instalação de unidades fabris e consequente geração de empregos diretos e indiretos.

Em relação à efetividade da implementação deste estudo, é observada na região do Vale do Paraíba Paulista que a análise apresentada neste trabalho de pesquisa vem sendo adotada e verifica-se a formação de um *cluster* de fornecedores aeronáuticos nas cidades da região de maneira similar ao que ocorre na indústria automobilística. Essa situação não é alterada caso ocorram fusões e aquisições, desde que sejam mantidos os regimes aduaneiros estudados.

REFERÊNCIAS

BALLOU, R. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos / Logística Empresarial**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Ed, 2006.

BASTOS, C. E. **Atributos de parcerias de sucesso em cadeias de suprimentos: um estudo de caso na relação fabricante-fornecedor na indústria aeronáutica**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo. 2007 <https://doi.org/10.11606/D.12.2007.tde-23042007-170254>

BRITO JUNIOR, I. DE; BELFIORE, P.; YOSHIZAKI, H. T. Y. Um modelo de

localização e transbordo multiproduto para avaliação do impacto de regimes aduaneiros. **Transportes**, v. 20, n. 3, p. 89–98, 2012.

<https://doi.org/10.4237/transportes.v20i3.624>

CAGLI, A.; KECHIDI M; LEVY, R., Complex product and supplier interfaces in aeronautics. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 23, n. 6, p.717 - 732, 2012. <https://doi.org/10.1108/17410381211253308>

DOSTALER, I. Competing in the global aerospace supply chain: The case of the Canadian aerospace industry. **Operations Management Research**, v. 6, n. 1–2, p. 32–43, 2013. - <https://doi.org/10.1007/s12063-013-0076-3>

FERREIRA, V. L.; SALERNO, M.; S; LOURENÇÃO.; P. T. M. As estratégias na relação com fornecedores: o caso Embraer. **Gestão & Produção**, v. 18, n. 2, p. 221-236, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2011000200001>

FINAN, J. J. **System Dynamics Analysis of an Ordering System used for Commercial Aircraft Manufacture**. Dissertação (Master of Science in Management and Master of Science in Aeronautics and Astronautics). Sloan School of Manangement-MIT, Cambridge, Ma, 1993.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. Waltham, Ma, 1961.

GHADGE, A.; KARANTONI, G.; CHAUDHURI, A.; SRINIVASAN, A. Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance: A system dynamics approach. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 29, n. 5, p. 846–865, 2018. <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2017-0143>

LAUERWALD, M.; STAUDACHER, S. The Aircraft Engine Game - System Dynamics of the Aerospace Industry. **Bonn**: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2014. Disponível em:

[https://publikationen.dglr.de/?tx_dglrpublications_pi1\[document_id\]=340058](https://publikationen.dglr.de/?tx_dglrpublications_pi1[document_id]=340058)

LYNEIS, J. M. Market Forecasting and Structural Analysis. **System Dynamics**, v. 16, p. 3–25, 2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(200021\)16:1%3C3::AID-SDR183%3E3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(200021)16:1%3C3::AID-SDR183%3E3.0.CO;2-5)

MAANI, K. E.; CAVANA, R. S. **System Thinking and Modeling**: Understanding Change and Complexity. Pearson Education, New Zealand. 2000.

MACK, R.; JIANG H.; PETERSON, R. M. **A Discussion of the Capacity Supply - Demand Balance within the Global Commercial Air Transport Industry**, Aviation System Analysis, Boeing Commercial Airplanes. 2013. Disponível em: <http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/assets/downloads/AirTransportCapacitySupplyDemandBalance.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2017.

MOGHADDAM, E. Z. *et al.* Industry Analysis: The Fastener Supply Chain in Aerospace Industry. *In*: Proceedings of the 30th International Conference of the

System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland. 2012.

NAGHIZADEH, M. *et al.* Managing integration in complex product systems: The experience of the IR-150 aircraft design program. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 122, p. 253–261, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.06.002>

PARK, T. Y.; KIM, J. Y. The capabilities required for being successful in complex product systems: case study of Korean e-government. **Asian Journal of Technology Innovation**, v. 22, n. 2, p. 268–285, 2014.

<https://doi.org/10.1080/19761597.2014.973166>

PIERSON, K.; STERMAN, J. D. Cyclical dynamics of airline industry earnings. **System Dynamics Review**, v. 29, p. 129–156, 2013.

<https://doi.org/10.1002/sdr.1501>

SENGE, P M. **A Quinta Disciplina** – Arte, Teoria, e Prática da Organização que Aprende. Best Seller, São Paulo. 2000.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. Management. McGraw-Hill Higher Education, Boston, 2000.

TAKO, A. A.; ROBINSON, S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. **Decision Support Systems**, v. 52, n. 4, p. 802 – 815. 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.11.015>

VERTESY, D.; SZIRMAI, A. **Interrupted Innovation: Innovation System Dynamics in Latecomer Aerospace Industries** United Nations University – Maastricht Economic and social Research and training centre on Innovation and Technology. Maastricht: The Netherlands, 2010.

WELLS, A. T. **Air transportation, a management perspective**. Belmont, California: Wadsworth Publishing Company, 1984.

YANG, M. M.; JIANG, H.; GARY, M. S. Challenging learning goals improve performance in dynamically complex microworld simulations. **System Dynamics Review**, v. 32, p. 204–232, 2016.

<https://doi.org/10.1002/sdr.1559>



Artigo recebido em: 09/03/2021 e aceito para publicação em: 21/02/2022

DOI: <http://doi.org/10.14488/1676-1901.v21i4.4244>