



III ENEI
Encontro Nacional de
Economia Industrial e Inovação

*Indústria e Desenvolvimento Econômico:
desafios e perspectivas*
18 a 20 de setembro de 2018
Uberlândia – Minas Gerais

Mudança tecnológica e estrutura de mercado: uma avaliação dos impactos da Indústria 4.0 sobre o setor aeronáutico

Marcos José Barbieri Ferreira e Celso Neris Jr. *

Área 5 – Inovação e mudança técnica, organizacional e institucional

5.7. Inovação, competências e competitividade

Resumo: Este trabalho procura discutir e avaliar os impactos do conjunto de tecnologias associadas à indústria 4.0 no setor aeronáutico. Para isto, utilizamos uma perspectiva teórica neoschumpeteriana que visa estabelecer os nexos existentes entre mudança técnica das firmas, estrutura de mercado e as revoluções tecnológicas propriamente ditas. Na sequência, foram selecionadas e conceituadas as principais tecnologias com elevado potencial de impacto na indústria aeronáutica, indicando a capacidade disruptiva de cada uma delas. A partir disso, estabeleceu-se uma tipologia dos impactos destas tecnologias nos vários segmentos da indústria aeronáutica procurando qualificar as alterações na estrutura de mercado como: (i) insignificantes; (ii) pequenas, quando há empresas entrantes; (iii) intermediárias, quando se estabelece um novo modelo de negócio e; (iv) grandes, quando há a criação de novas categorias de produtos. Ademais, procuramos mostrar a possibilidade da criação de um novo segmento que estará centrado na oferta de serviços de transporte aéreo urbano de uso compartilhado, com o uso de veículos de pouso e decolagem vertical, propulsão elétrica e pilotagem autônoma, conformando o papel disruptivo de algumas tecnologias analisadas.

Palavras-chaves: Indústria aeronáutica. Mudança tecnológica. Indústria 4.0

Abstract: This paper seeks to discuss and evaluate the impacts of the group of innovations brought by industry 4.0 in the aeronautical sector. For this, we use a neoschumpeterian theoretical perspective that aims to establish the existing links between technical change of firms, market structure and the technological revolutions themselves. In the next part were selected and conceptualized the main technologies with high potential impact in the aeronautical industry, indicating the disruptive capacity of each one. As a result, it was defined a typology of impacts of these technologies in the various segments of the aviation industry looking qualify the changes in market structure: (i) negligible; (ii) small when there are new entrants; (iii) intermediate, when establishing a new business model and; (iv) large, when there is the creation of new product categories. In addition, we try to show the possibility of creating a new segment that will focus on providing urban air transport services for shared use, with the use of landing vehicles and vertical takeoff, electrical propulsion and autonomous driving, shaping the disruptive role of some analyzed technologies.

Keywords: Aeronautical industry. Technological change. Industry 4.0

JEL: L11; O31; O33

* Respectivamente, professor da Faculdade de Ciências Aplicadas da Unicamp (FCA/Unicamp) e pesquisador do Núcleo de Economia Industrial e da Tecnologia (NEIT/Unicamp) e professor do Departamento de Economia da Unesp (DE/Unesp) e pesquisador do Grupo de Estudos em Economia Industrial (GEEIN/Unesp). Ambos são pesquisadores do Laboratório de Estudos das Indústrias Aeroespaciais e de Defesa (LabA&D/Unicamp) Emails: marcosbarbieriferreira@gmail.com e cnrisjr@gmail.com.

Introdução

Este trabalho procura discutir o papel da mudança tecnológica identificada com a indústria 4.0, ou a chamada 4ª revolução industrial, na estrutura de mercado da indústria aeronáutica, que é caracterizada por uma alta taxa de atualização tecnológica de seus produtos e processos produtivos, que visa, em última instância, o aumento de vantagens no âmbito concorrencial. Não é do interesse deste trabalho discutir a grandeza das mudanças tecnológicas concernentes, de modo a estabelecer se estamos vivenciando realmente uma revolução ou não. No entanto, partimos do entendimento de que existem grandes mudanças capazes de impactar *como as empresas produzem*, ao alterar significativamente a eficiência dos seus processos produtivos ou mesmo permitirem novas funções; *como estão produtivamente organizadas*, pois estabelece a possibilidade de uma produção mais integrada localmente, por exemplo; e *o que produzem*, uma vez que propicia o surgimento de novos produtos. Pretende-se mostrar, portanto, que algumas tecnologias vinculadas à indústria 4.0 estão, nestes termos, provocando alterações significativas na estrutura de mercado do setor aeronáutico.

Para isto, partimos de uma análise da literatura que nos permitem identificar os elementos que afetam uma estrutura de mercado, por meio das mudanças tecnológicas. Procuramos identificar, ao longo da revisão teórica, como a indústria aeronáutica é um exemplo das relações examinadas pela abordagem neoschumpeteriana. Em seguida, na segunda seção, à luz do recente estudo realizado por IEL/Ferreira (2018), selecionamos algumas das principais tecnologias que foram consideradas como possuindo grande possibilidade de impactos nos setores industriais nos próximos dez anos. Iremos apresentá-las buscando evidenciar suas definições e funcionalidades para a indústria aeronáutica. Na seção 3, procuramos, enfim, apresentar os segmentos que compõem a indústria aeronáutica evidenciando, em cada um deles: (a) estrutura de mercado atual, (b) quais tecnologias e como elas os impactam atualmente e (c) as mudanças que podem ser observadas em (a) decorrentes de (b). Esta forma de apresentação contém o desafio de se tentar perceber as alterações na indústria aeronáutica estando elas ainda em curso, de modo que será possível também apontarmos, em alguns momentos, as expectativas de como este setor poderá se conformar ao longo dos próximos dez anos. Destacaremos os movimentos dos atores para se adequarem a estas mudanças tecnológicas que implicam na possibilidade de (i) mudanças de posições de liderança, decorrente de produtos ou processos mais eficiente pela utilização das novas tecnologias; (ii) reforço da posição de dominância dos líderes frente a potenciais entrantes, pelo domínio das tecnologias que poderão causar alguma mudança; (iii) novos entrantes com novos produtos; (iv) novos modelos de negócio e; (iv) criação de um novo segmento. Na seção 4, sistematizamos a discussão dos impactos das novas tecnologias sobre a estrutura de mercado, estabelecemos uma tipologia das mudanças discutidas nos segmentos. Por fim, tecemos breves considerações.

1. Mudança técnica, Estrutura de mercado e Revoluções tecnológicas

A mudança técnica está muito bem documentada e analisada por autores vinculados à economia evolucionária ou neoschumpeteriana (Nelson e Winter, 1977, 1982; Nelson, 1984; Dosi, 1982; Rosenberg, 1982; Freeman e Soete, 1997). Inspirados nos trabalhos de Schumpeter (1934, 1942), os autores associados a esta abordagem tratam a inovação tecnológica como um elemento de mudança potencial da realidade econômica, uma vez que ela carrega consigo a possibilidade de alterar as estruturas de mercado subjacentes – que compreendem as posições das firmas, no âmbito dos seus setores de atuação, em termos de *market share*, que, em última instância, está relacionado à mudança ou não daquilo que elas fazem e/ou podem fazer. O conceito de inovação é consideravelmente amplo em Schumpeter. Segundo o autor, a inovação pode ser definida como (i) introdução de um novo bem; (ii) introdução de novas técnicas de produção; (iii) descobertas de novas fontes de matérias-primas ou insumos; (iv) abertura de novos mercados; (v) novas formas de organização industrial (Schumpeter, 1934).

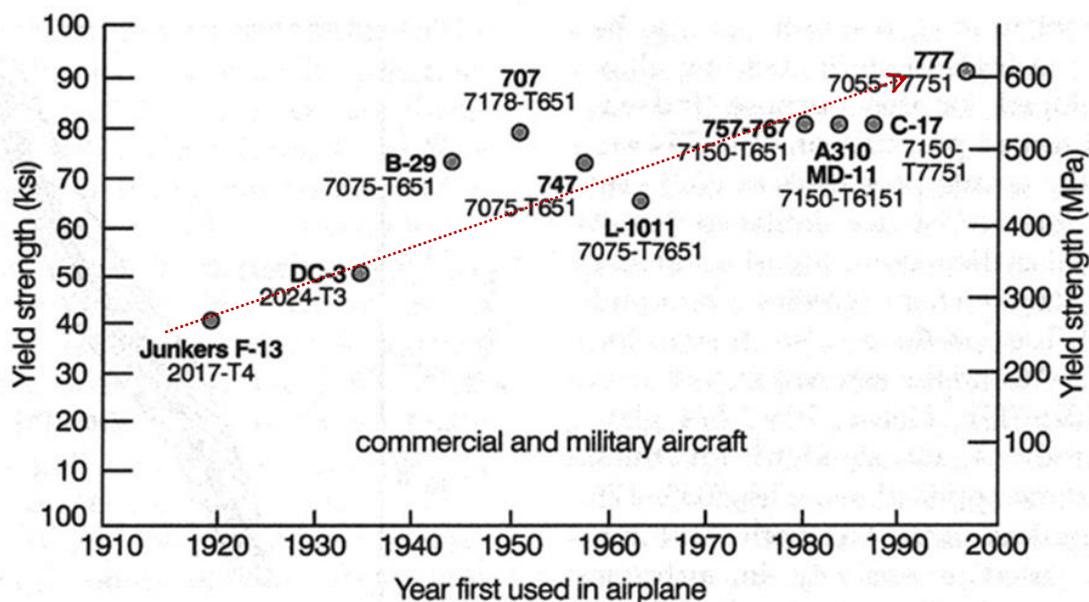
Esta definição de inovação possui elementos que se inter-relacionam. Por exemplo, a descoberta de novas fontes de matérias-primas e insumos e/ou novas técnicas e formas de produção podem desencadear a abertura ou redimensionamento dos mercados (no sentido de possibilitar a entrada de

novos atores vis-à-vis o reposicionamento, ou mesmo a eliminação, de antigos), bem como estabelecer novas formas de organização industrial (um controle ou uma nova forma de organização da cadeia produtiva, também denominada como novo modelo de negócio).

Este trabalho não pretende fazer uma longa exposição sobre a teoria neoschumpeteriana. No entanto, para se analisar o papel das mudanças associadas às tecnologias da chamada Indústria 4.0 e seus impactos na indústria aeronáutica, alguns elementos teóricos tratados aqui permitirão balizar a discussão. Em primeiro lugar, destaca-se o conceito de “destruição criativa” de Schumpeter (1942, p.83). O termo denota a ideia de destruição da rotina das firmas, pois se trata do estabelecimento de novos produtos, novas formas de organização e serviços que implicam na emergência de novos parâmetros de concorrência ou, no mínimo, de uma nova rotina. É este impulso incessante das firmas para procurarem melhores técnicas e/ou melhores combinações, o responsável pelo caráter de evolução permanente das economias. Necessário distinguir, de antemão, o caráter “endógeno” e “exógeno” do progresso tecnológico (Dosi, 1982, p.25). As mudanças exógenas estão relacionadas à emergência de novos “paradigmas” tecnológicos, enquanto que mudanças endógenas relacionam-se aos caminhos da resolução de problemas tomados pelas firmas, isto é, são as “trajetórias” definidas por esses paradigmas.

Paradigma tecnológico é definido, segundo Dosi (1988), como uma convenção técnica ou científica a respeito das possibilidades de solução de problemas encontrados no processo de criação e produção de artefatos. Portanto, ele tem implícita uma série de direções específicas que podem ser tomadas pela firma. Tais trajetórias podem ser descritas como um *trade-off* multidimensional entre as variáveis tecnológicas que o paradigma define como relevante, de forma que o progresso ao longo de uma trajetória possa ser definido como a melhoria destes *trade-offs*. Um exemplo é a trajetória de evolução da relação entre peso e resistência das ligas de alumínio utilizadas na indústria aeronáutica ao longo do século XX, conforme o gráfico abaixo.

Gráfico 1 – Ligas de alumínio utilizadas na indústria aeronáutica: relação peso X resistência, 1910-2000



Fonte: Nayak (2014).

Isto implica que as firmas “atuam dentro de um espectro de possibilidades” (Freeman e Soete, 1997, p.456). Estas possibilidades são oriundas da dinâmica tecnológica na qual as firmas estão inseridas. Mas, nem todas as firmas são capazes de perceber e, com isso, aproveitarem-se, em termos de vantagem concorrencial, dos processos de mudança. É por esta razão que Nelson e Winter (1977) afirmam que as

firmas diferem na medida em que exploram tais trajetórias e essas diferenças no aproveitamento de oportunidades influenciam, em última instância, a ascensão e queda de diferentes tecnologias e setores.

Dois motivos, em um primeiro momento, podem ser elencados sobre a probabilidade das firmas aproveitarem ou não essas oportunidades. Em primeiro lugar, podemos partir do conceito de base produtiva (ou tecnológica), desenvolvido por Penrose (1959, p.176). Segundo a autora, esta base é um conjunto de recursos desenvolvidos internamente pela firma ao longo do tempo, que podem ser máquinas, formas específicas de organizar processos, qualificações e insumos ou suprimentos produtivos que são complementares entre si e se interligam no processo produtivo. Existe um potencial a ser exercido, a partir deste estoque de conhecimento incorporado nos recursos, de utilizações distintas das rotineiras, que depende da busca das firmas (Nelson e Winter, 1982). Isto é, as firmas podem mudar seus serviços produtivos, gerando novos produtos, a depender da direção tecnológica assumida, bem como podem revê-los. Evidente, que isto não se dá de maneira homogênea entre os diversos setores da indústria, o que é mais um elemento de risco a se considerar na decisão de inovar de determinadas empresas. A mudança de trajetória, uma vez assumida, não se altera facilmente, particularmente quando existem elevados custos irrecuperáveis (*sunk costs*). Um relevante exemplo na indústria aeronáutica é o da empresa estadunidense Douglas Corp. que se consolidou como líder da aviação comercial no pós-guerra com o lançamento dos modelos quadrimotores a hélice DC-6 e DC-7. Em razão dos elevados recursos dispendidos no desenvolvimento dessas aeronaves, a empresa não investiu na tecnologia a jato, sendo suplantada pela Boeing nos anos 1950, com a entrada em operação do modelo 707 de propulsão a jato (Ferreira, 2012, p.22).

Cabe ainda ressaltar que a base tecnológica de uma firma não é desenvolvida apenas internamente. A interação com centros de pesquisa, universidades e outros atores que constituem os sistemas setoriais de inovação (Malerba, 2002) e os sistemas nacionais de inovação (Lundvall, 1992) são fundamentais para a expansão e atualização desta base, a partir do (entre outras coisas) processo de interação entre aquilo que é considerado ciência básica e tecnologia aplicada. No caso da indústria aeronáutica, a organização e o funcionamento de empresas aeronáuticas em sistemas locais de inovação, a exemplo de Toulouse na França, Seattle nos Estados Unidos, Montreal no Canadá e São José dos Campos no Brasil, revelou ser um caminho fundamental para a consolidação dessa indústria (Bernardes, 2007).

O segundo motivo está relacionado com as expectativas e incertezas tecnológicas decorrentes da adoção de uma determinada direção tecnológica. Aqui deve se qualificar o fato de que as mudanças potenciais, decorrentes da adoção de novas tecnologias, não são percebidas *ex ante* por qualquer ator, por mais bem informado que este seja. Nesse sentido, a mudança técnica empreendida por uma firma pode ser considerada uma aposta que deve ser feita mediante a (tentativa de) diminuição dos riscos potenciais, apenas parcialmente antecipados. Este tema é tratado por Rosenberg (1982) em seu capítulo sobre as expectativas tecnológicas. O autor traz uma série de casos a respeito do ritmo com que tecnologias existentes são aprimoradas e novas tecnologias são adotadas. Segundo ele, “a escolha do momento e a natureza da decisão da adoção [das inovações tecnológicas], por parte das firmas de negócios individuais, é uma questão-chave”. (Rosenberg, 2006. p.164). É por esse motivo que o autor destaca as expectativas dos atores em relação ao ritmo futuro da própria mudança tecnológica. No entanto, esta “incerteza tecnológica” é um elemento que estabelece uma diferença ainda maior no comportamento entre as firmas, pois estas são diferentes nos seus diversos “graus de aversão ao risco”. Na indústria aeronáutica, essa incerteza é agravada, ainda mais, pelos elevados custos de introdução das inovações radicais. O desenvolvimento de uma nova geração de aeronaves tem atingido valores cada vez mais elevados, de forma que uma inovação mal sucedida passa a comprometer a sobrevivência da própria empresa (Ferreira 2009, p.39). Por exemplo, o lançamento do Boeing 707, nos anos 1950, representou cerca de 20% dos ativos totais da companhia, enquanto que nos anos 1970, os custos de desenvolvimento do Boeing 747 representaram mais de 90% desses ativos (Whitford, 2007). Desta maneira, a escolha de uma trajetória tecnológica errada ou, mesmo que numa trajetória correta, do momento errado de entrada, possivelmente leva a empresa a ter que abandonar esse segmento de mercado ou, ainda, a sua falência.

Ademais, o ambiente de incerteza é claramente maior quando se deflagram novas possibilidades tecnológicas, em geral, associadas às grandes revoluções tecno-econômicas (Perez, 2010). Existe, no entanto, um processo de estabilização – entendido como uma direção parcialmente definida da trajetória tecnológica – que decorre do processo da co-evolução da tecnologia, estrutura industrial e instituições (Nelson, 1995). Em primeiro lugar, destaca-se a co-evolução entre tecnologia e estrutura industrial. Nelson (1995) apresenta o argumento de Abertnathy e Utterback (1978), neste sentido. Segundo os autores, quando novas tecnologias surgem, há considerável incerteza acerca da variedade de possibilidades decorrentes, pois diferentes combinações serão tentadas em diferentes lugares até que, após um período de experimentação, um projeto de design dominante (ou simplesmente, projeto dominante) será identificado e reconhecido. De acordo com Utterback (1996, p.93):

O caso do avião DC-3 é um exemplo de como o consenso pode ser obtido em um produto. O DC-3 (...) é o ápice de inovações anteriores e estabeleceu o padrão para aeronaves comerciais por duas décadas. Ele não foi o maior, nem o mais rápido, nem o avião com maior raio de ação a voar quando foi lançado, mas era simplesmente o único avião econômico, grande e rápido, capaz de voar longas distâncias. O DC-3 atendeu a necessidades de mercado de maneira tão eficaz que, na verdade, ele forneceu os conceitos básicos para o projeto de aeronaves comerciais desde o instante de sua criação, na metade da década de 30, até o aparecimento dos jatos comerciais no final dos anos 50.

De acordo com Nelson (1995, p.51-55), se as tecnologias possuem um alto grau de cumulatividade, é natural esperar uma vantagem inicial daqueles que “saíram na frente” em seus processos inovativos, na definição do projeto dominante. Entretanto, de acordo com Mowery e Rosenberg (2005, p.80) existem os riscos de ser o “primeiro do mercado” na aplicação de uma nova tecnologia disruptiva. Por exemplo, a introdução do jato Comet da DeHavilland em 1952 acabou sendo um desastre, pois a falha em prever a fadiga dos metais resultou em uma série de acidentes e no fracasso comercial da aeronave. O Boeing 707, que surgiu em sequência, corrigiu esta falha e não apenas se tornou um grande sucesso comercial, como definiu os novos parâmetros para os futuros aviões comerciais a jato.

Os elementos até aqui apresentados ressaltam o fato que, dada uma mudança de paradigma tecnológico, as direções tomadas pelas firmas, a fim de se manterem em uma estrutura de mercado ou acompanhar a mudança subjacente, que impliquem em alterações na estrutura pré-existente, dependem fundamentalmente de dois fatores: (i) das capacidades acumuladas pelas empresas ao longo de suas atividades e da interação com o ambiente (que inclui uma diversidade de atores) do qual fazem parte e (ii) da decisão de empreender tais mudanças (adotar determinadas estratégias), tendo em vista o ambiente inerentemente incerto, que pode implicar tanto em uma aposta errada, em termos de captar a direção correta do progresso tecnológico, como também, caso optem por não avançar em uma trajetória que desencadeie em um novo projeto dominante, ser alijadas do processo concorrencial no qual estão inseridas.

Esses crescentes desafios, inerentes ao próprio processo inovativo, por vezes, exigem o ativo suporte dos respectivos Estados Nacionais no processo de desenvolvimento tecnológico. Este suporte vem sendo oferecido por meio do estabelecimento de linhas de financiamento, mecanismos de compras públicas, fornecimento de infraestrutura, apoio às exportações, participação direta nas empresas, etc.¹. Alguns trabalhos, como o de Dreissnack e King (2007), demonstram a importância das políticas públicas para o desenvolvimento da indústria aeronáutica, desde sua origem, no início do século XX, até os projetos atuais, como o do avião de caça F-35 Lightning II, cujo desenvolvimento consumiu mais de US\$ 55 bilhões do orçamento federal dos EUA (SAR, 2018).

Nelson (1995, p.55-57) enfatiza ainda a importância do conjunto do ambiente institucional para o desenvolvimento e consolidação de uma determinada mudança tecnológica. De acordo com o autor é necessária uma evolução conjunta não só no âmbito das firmas, mas também de sociedades técnicas,

¹ Para ver uma análise mais desenvolvida sobre este tema, consultar Mazzucato (2012) cujo trabalho destaca o papel dos governos como fomentadores, em última instância, dos desenvolvimentos recentes na indústria de telefonia móvel e eólica.

universidades, legislação, agências governamentais que devem adaptar-se a tais mudanças e, de alguma forma, de maneira recursiva, também influenciar a direção destas mudanças². Por esta razão, podemos dizer que o processo inovativo é altamente complexo, envolve uma diversidade de atores e se move em um ambiente de incerteza. Isso tem como corolário uma série de modelos que tentam captar, ao menos logicamente, como a inovação se dá (ver, por exemplo, o modelo de Kline e Rosenberg, 1986, utilizado pelo Manual de Oslo, 2005, da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE).

Para avançar na análise das grandes mudanças que dão origem a todo esse movimento das firmas, alguns comentários são necessários sobre o âmbito macro, cujas raízes estão profundamente nos microfundamentos da mudança tecnológica já aqui mencionados. Carlota Perez (2010) discute isto a partir da ideia de revoluções tecnológicas. Para ela, ao longo do tempo, uma tecnologia individual inicia uma revolução – uma espécie de *big bang* – que, em seguida, desencadeia uma série de melhoramentos exploratórios até que se chegue a uma trajetória definida, na qual existirá um projeto dominante. Após essa fase, até o processo de maturidade tecnológica (último estágio), as direções da trajetória da tecnologia inicial vão ficando mais claramente definidas, de modo que os melhoramentos se darão de maneira mais aceleradas e uma série de modelos serão estabelecidos até, enfim, serem exauridas todas as possibilidades de melhoria. Quando isto acontece, a tecnologia pode ser considerada madura.

Diante disso, a revolução tecnológica pode ser definida como aquela na qual há, concomitantemente, um conjunto de avanços disruptivos inter-relacionados, que formam uma constelação de tecnologias interdependentes, isto é, “um *cluster* de *clusters*” (Perez, 2010, p.189). Por exemplo, o desenvolvimento computacional nos anos 1970, cujo *big bang* foi possibilitado pelo advento dos microprocessadores, foi seguida por uma série de produtos e processos que provocaram *feedback loops* tanto nas tecnologias, quanto nos mercados, resultando na revolução da tecnologia de informação dos anos 1980 (Coutinho, 1992). Para Perez (2010), o que distingue uma revolução tecnológica de uma coleção aleatória de sistemas tecnológicos são duas características: (i) a forte interconectividade e interdependência dos sistemas participantes em suas tecnologias e mercados e (ii) a capacidade de transformar profundamente o restante da economia e, eventualmente, a própria sociedade³.

É preciso, à luz dessas considerações, compreender o atual conjunto de transformações pela qual vem passando a indústria em escala global. O termo *Indústria 4.0*, cunhado em 2011 por Henning Kagermann, chefe da Academia Alemã de Ciências e Engenharia (Acatech), é um dos mais utilizados em todo mundo para se referir ao amplo conjunto de mudanças tecnológicas que vem impactando na estrutura produtiva mundial⁴ (Hermann et al, 2015). Neste sentido, qual a dimensão das transformações geradas pela Indústria 4.0, um desdobramento e aprofundamento da Terceira Revolução Industrial ou uma Quarta Revolução Industrial? Ainda não há um consenso na comunidade acadêmica, pois o objeto de estudo ainda é um domínio em constante fluxo e mudança (Schwab, 2016; 2016; Garbee, 2016). Contudo, não há dúvida que esses *clusters* compostos por novas e disruptivas tecnologias trarão grandes impactos sobre a estrutura da indústria, particularmente dos setores mais intensivos em tecnologia (McKinsey, 2016). O que se segue é uma discussão sobre as principais tecnologias trazidas pela Indústria 4.0 que julgamos mais relevantes para o setor aeronáutico e, em seguida, uma avaliação dos seus impactos sobre a estrutura produtiva desse setor industrial, à luz da discussão aqui desenvolvida.

² Por exemplo, o *transponder* aeronáutico, que surgiu durante a II Guerra Mundial visando identificar aeronaves amigas-inimigas, passou a ser utilizada na aviação comercial nos anos 1950-1960. As regras de certificação aeronáutica passaram a exigir esta tecnologia e delimitaram o desenvolvimento do Sistema Anticolisão de Tráfego (TCAS).

³ Tecnologias bem conhecidas, como a fundição de minério, motores a vapor, petróleo, eletricidade e, mais recentemente, a internet e a biotecnologia tiveram um impacto profundo, tanto na economia, como na sociedade. Essas inovações fazem parte do que Bresnahan e Trajtenberg (1995) chamam de Tecnologias de Propósito Geral (*General-purpose technologies* – GPT).

⁴ Estas diferentes nomenclaturas designam, muitas vezes, um *brand* relacionado ao projeto tecnológico-científico nacional de determinados países. No caso da Alemanha, podemos ver a nomenclatura *Indústria 4.0* para designar esta ampliação da digitalização do processo produtivo, que designa a ampla competência em engenharia (bens de capital) deste país. No caso dos EUA, o termo mais utilizado é *Industrial Internet*, para designar a competência em digitalização deste país e a sua intenção revelada de retomar a manufatura.

2. Principais tecnologias da Indústria 4.0 relacionadas ao setor aeronáutico

Conforme apresentado, a Indústria 4.0 trás um amplo conjunto de inovações tecnológicas, muita das quais disruptivas, com alto potencial de transformação sobre a competitividade das empresas e a estrutura da indústria de transformação em âmbito global (McKinsey, 2016). Esta seção busca identificar e analisar as principais inovações tecnológicas que vem impactando a competitividade da indústria aeronáutica mundial hodiernamente.

Uma parte significativa das inovações é derivada das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) e estão reunidas em três *clusters* que operam de maneira complementar e integrada, sendo eles: inteligência artificial, tecnologias de redes e internet das coisas. Por sua vez, as inovações relacionadas diretamente com a atividade fabril estão reunidas no *cluster* denominado produção inteligente e conectada. Na sequência é apresentado um *cluster* específico para as inovações na área de materiais. Por fim, o sexto e último *cluster*, engloba as tecnologias relacionadas com o armazenamento de energia. Desta maneira, as tecnologias-chave estão agrupadas em seis *clusters* – definidos de acordo com as especialidades dos conhecimentos envolvidos – com o objetivo de reconhecer as principais tendências para esta indústria (IEL/Ferreira, 2018; Klotzel, 2015).

Inteligência Artificial (IA)

A inteligência artificial vem apresentando uma excepcional expansão nos últimos anos em decorrência de dois fatores. Primeiro, o grande volume de dados que vem sendo gerado e disponibilizado por conta do avanço da digitalização. Segundo, a elevada capacidade e velocidade de armazenamento, processamento e análise desses dados, que é resultado tanto de hardwares mais potentes como de softwares mais avançados⁵. Na indústria aeroespacial destaca-se a utilização da IA para: (i) monitorar e aperfeiçoar o desempenho das aeronaves, particularmente no que se refere à manutenção das aeronaves; (ii) utilizar os dados sobre voos, passageiros e cargas em serviços oferecidos aos clientes de acordo com suas necessidades, sendo esta estratégia denominada “servitização” (Crabbe, 2013 *apud* OCDE, 2016); (iii) melhorar a interface homem-máquina, com destaque para o uso dos comandos de voz; (iv) gerar e identificar imagens, por exemplo, a realidade virtual dos simuladores de voo cada vez mais confiáveis, eficientes e baratos; (v) implementar a pilotagem (parcialmente) autônoma e; (vi) otimizar as atividades produtivas e administrativas.

Novas Tecnologias de Rede

As tecnologias de redes têm um papel-chave na indústria aeronáutica, pois permitem a integração em três diferentes níveis. No âmbito do produto, as avançadas redes de fibra ópticas possibilitam a integração dos sistemas de controle da aeronave, denominadas *fly-by-light*. No nível do processo produtivo das aeronaves, as novas tecnologias de rede possibilitam a integração desde o ambiente da fábrica até as cadeias globais de suprimentos. Por fim, no nível dos “sistemas de sistemas”, destaca-se a integração do ambiente de voo, através dos novos sistemas de controle de tráfego aéreo ou, na área militar, dos sistemas de guerra centrada em redes (*network-centric warfare*). Ambos baseados na tecnologia de comunicação por dados em tempo real (*datalink*) (SESAR/FAA, 2016; Wilson, 2015). Dado que essas tecnologias de rede passam a ocupar uma posição imprescindível e cada vez mais importante na indústria aeronáutica, o desempenho e a segurança das redes (*cyber security*) são os dois requisitos chaves na trajetória de evolução dessa tecnologia nesta indústria. Em razão disso, as tecnologias que envolvam a segurança na transmissão dos dados passam a ser fundamentais, particularmente a criptografia, pois esta utiliza tecnologias e algoritmos específicos. No entanto, outras tecnologias de segurança de rede, como os *firewalls*, vem sendo utilizadas de forma complementar (Loral, 2017).

⁵ Entre os instrumentos mais difundidos da IA tem-se o *Big Data*, o *Machine Learning* e o *Deep Learning* (Prado, 2017).

Internet das coisas (IoT)

A internet das coisas (*Internet of Things* – IoT) possibilita captar as informações através de sensores e retornar as ações através de atuadores. Desta maneira, está necessariamente integrada com as tecnologias de IA, que possibilita o processamento “inteligente” das informações coletadas e das redes, que permitem a transmissão destas informações. Por exemplo, uma “aeronave incorpora capacidade computacional embarcada e os dados produzidos pelos sensores são analisados em tempo real por meio de inteligência artificial distribuída, de modo que os diagnósticos possam ser feitos ainda durante o voo” (Bordeaux-Rego, 2017, p.11). O elevado volume de informações captadas pelos modernos sensores, processadas e transmitidas aos atuadores, possibilita melhor desempenho e maior segurança das aeronaves, além de reduzir os custos operacionais, bem como otimizar as manutenções, informando qual o tipo de intervenção necessária e quando esta deve ser realizada (manutenções preditivas). Apesar do excepcional crescimento do uso de sensores nas aeronaves, a difusão das tecnologias IoT embarcada que possibilitem operações autônomas é bem mais lenta, pois necessita passar por um longo e rigoroso processo de certificação que demonstre a sua confiabilidade e segurança. Desta maneira, as inovações mais disruptivas da IoT estão atualmente direcionadas às operações com *drones* possibilitando uma crescente automatização nas operações desses veículos. Cabe ainda ressaltar a crescente introdução e difusão das tecnologias relacionadas com a IoT nas atividades produtivas das empresas aeronáuticas e também nas relações dessas empresas dentro da cadeia de suprimentos, incluindo logística e serviços pós-venda.

Produção Inteligente e Conectada (PIC)

A produção inteligente e conectada abrange um conjunto de tecnologias inovadoras e inter-relacionadas que está sendo incorporado ao processo produtivo dos setores industriais mais avançados (Naveiro, 2017). Estas tecnologias estão intrinsecamente associadas às tecnologias de redes, IA e IoT. Na indústria aeronáutica, a PIC está avançando em quatro tecnologias centrais: (i) robótica – utilizada em atividades repetitivas e que necessitam de elevada precisão, como a furação e colocação de rebites nas aeroestruturas. Desta maneira, a automação está avançando nos segmentos que apresentam maiores escalas, produtos padronizados e elevada carga de trabalho humana, como a montagem de grandes aviões comerciais (Weber, 2015); (ii) manufatura aditiva – também conhecida como impressão 3D, que está restrita aos componentes de elevada complexidade de projeto e alto valor agregado; (iii) novos processos produtivos – com destaque para as tecnologias que permitem a junção de partes metálicas, sem a necessidade de rebites ou soldagem⁶ e; (iv) virtualização da produção – basicamente a simulação de produtos (protótipos) e processos produtivos com elevado realismo e confiabilidade (IEL/Ferreira, 2018).

Materiais Avançados (MA)

A tecnologia de materiais apresenta uma importância central para a indústria aeronáutica em decorrência do baixo peso, elevada resistência e imprescindível segurança que as aeronaves precisam demonstrar. Desta maneira, trata-se de um dos elementos chaves na concepção, projeto e desempenho de todas as categorias de aeronaves (Nayak, 2014). As principais inovações trazidas pela Indústria 4.0 que vem sendo introduzidas nas tecnologias de materiais são: (i) desenvolvimento das ligas de alta entropia (HEA) que combinam múltiplos elementos; (ii) avanço das ligas leves de metais reforçadas com nanotubos de carbono; (iii) desenvolvimento de compósitos nanoestruturados que combinam a tecnologia dos compósitos convencionais com os nanotubos de carbono; (iv) avanços tecnológicos em metais, polímeros e cerâmicas decorrentes da introdução da tecnologia de manufatura aditiva; (v) crescente importância das “terras raras”, particularmente como insumo na produção de ímãs de elevada capacidade, utilizados nos inovadores motores elétricos de baixo peso e alto desempenho (Carvalho, 2017). Nos projetos das aeronaves tecnologicamente mais avançadas – como os aviões de caça de quinta geração –

⁶ Destaque para as tecnologias *Laser Beam Welding* (LBW) e *Friction Stir Welding* (FSW) (Siqueira, 2014; Kallee, 2001).

identifica-se que os materiais avançados são utilizados de maneira combinada, buscando se aproveitar ao máximo as características técnicas de cada um deles.

Armazenamento de Energia (AE)

O principal impacto do *cluster* de tecnologias de armazenamento de energia voltadas para o setor aeronáutico é o de possibilitar o desenvolvimento de aeronaves de propulsão elétrica e, assim, atender duas importantes demandas. De um lado, a maior eficiência energética, resultando em menores custos operacionais. De outro lado, contribuir para redução das emissões dos gases de efeito estufa. Atualmente os motores elétricos abastecidos por baterias recarregáveis estão praticamente restrito aos veículos aéreos não tripulados de pequenas dimensões e a alguns modelos experimentais de aviões leves (Torresi, 2017).

3. Impactos das tecnologias da Indústria 4.0 na estrutura de mercado do setor aeronáutico

A indústria aeronáutica é uma das mais avançadas do mundo em termos de novas tecnologias. No entanto, a incorporação dessas inovações entre os diferentes segmentos que compõem esta indústria é bastante heterogênea. Por exemplo, enquanto os aviões de caça estão na fronteira tecnológica incorporando muitas tecnologias disruptivas ainda não testadas, os aviões leves utilizados para treinamento e recreação operam com tecnologia já consolidada, incorporando poucas inovações. Seguindo os critérios utilizados no estudo IEL/Ferreira (2018) – que classifica as aeronaves de acordo com as tecnologias constitutivas e as categorias de uso – neste artigo o setor aeronáutico está dividido em nove diferentes segmentos, como é apresentado no quadro abaixo.

Quadro 1 – Indústria aeronáutica: Classificação em segmentos

Segmentos								
Militar			Comercial		Aviação Geral		Asas Rotativas	Veículo Aéreo não Tripulado (VANT)
Combate	Treinamento	Transporte	Jatos	Turboélices	Jatos Executivos	Leves		

Fonte: Elaboração própria.

Estes nove segmentos que compõem a indústria aeronáutica estão agrupados de acordo com os impactos das tecnologias da Indústria 4.0 sobre a estrutura de mercado, tendo como perspectiva um prazo de dez anos. Para isto, estabeleceu-se à luz da discussão teórica, quatro categorias, divididas de acordo com o impacto das novas tecnologias: (a) estruturas de mercado sem alterações significativas; (b) estruturas de mercado com pequenas alterações em decorrência de novos entrantes; (c) alterações intermediárias na estrutura de mercado devido à criação de novos modelos de negócios e, conseqüentemente, novos entrantes; (d) grandes alterações na estrutura de mercado resultantes do desenvolvimento de novas categorias de produtos, novos modelos de negócios e novos entrantes. Por fim, cabe ressaltar que o impacto das inovações disruptivas provavelmente resultará na criação de um novo e dinâmico segmento da indústria aeronáutica, no caso o segmento de veículos aéreos urbanos autônomos.

Estruturas de mercado sem alterações significativas

A estrutura de mercado do segmento de *asas rotativas* é caracterizada como um oligopólio concentrado em nível mundial. Em 2015, mais de 90% da produção mundial de helicópteros estava restrita a cinco grandes empresas, sendo duas estadunidenses, duas europeias e uma russa (AWIN, 2018).

A participação no mercado mundial das empresas de outros países de fora da tríade EUA-Europa-Rússia tem sido muito marginal e, mesmo no caso da China, seus principais projetos estão direta ou indiretamente vinculados a alguma das grandes fabricantes de helicópteros, na forma de produções sob licença e acordos de desenvolvimento conjunto (Leboulanger, 2012). Entre os principais avanços tecnológicos destaca-se a utilização de compósitos, que já são empregados, inclusive em componentes críticos, como as pás de sustentação, e devem continuar a ser incorporados de maneira crescente nas cabines. Algumas inovações baseadas nas TIC devem ser incorporadas, de maneira incremental e progressiva ao longo dos próximos 10 anos, particularmente as tecnologias de IA, que devem contribuir na interface homem-máquina das aeronaves de asas rotativas. Além disso, as tecnologias de redes devem ser progressivamente incorporadas em virtude da implementação dos novos sistemas de controle de tráfego aéreo. Apesar da baixa escala produtiva desse segmento, também devem ser introduzidas diversas inovações incrementais no processo produtivo, particularmente as relacionadas com manufatura aditiva. De acordo com IEL/Ferreira (2018), a maioria das inovações previstas para os próximos dez anos no segmento de helicópteros deve apresentar caráter incremental. Como resultado, a possibilidade de mudanças na estrutura de mercado e de contestação das empresas líderes nos próximos dez anos são quase inexistentes.

No segmento dos *aviões de combate*, atualmente apenas três modelos de aviões de caça de quinta geração estão operacionais, dois desenvolvidos nos EUA pela Lockheed Martin, e um na China pela chinesa AVIC. Além desses, em 2019 deve entrar em operação o avião russo Sukhoi Su-57, da United Aircraft Corp. (UAC) (Allison, 2018; Forecast International, 2018). Com relação às empresas europeias, apenas no final de 2017 a Dassault Aviation e a Airbus anunciaram um acordo visando o desenvolvimento de um avião de combate de quinta geração, denominado *Future Combat Air System* (FCAS), que deverá entrar em operação após 2030 (Jennings, 2017). Desta maneira, não se devem observar na próxima década mudanças disruptivas decorrentes do lançamento de uma sexta geração de aviões de caça. A maioria dos avanços tecnológicos no segmento de aviões de caça deverá ser incremental, no entanto, as inovações mais disruptivas devem se concentrar na IA, particularmente no que se refere à interface homem-máquina, com a adoção de tecnologias que possibilitem uma completa consciência situacional, maior segurança e redução na carga de trabalho. Juntamente com a IA, a crescente adoção de sensores (IoT) também será essencial para avaliação contínua do desempenho e manutenção das aeronaves. As novas tecnologias de rede devem ser gradualmente incorporadas nos modernos aviões de combate, aprimorando a realização de operações conjuntas e coordenadas em ambientes de rede, denominadas *network-centric operations* (Wilson, 2015). Apesar de serem baixas as escalas de alguns modelos, as exigências técnicas devem ampliar a automatização de diversas etapas, além de intensificar o uso da manufatura aditiva. Com relação aos materiais avançados, os novos modelos devem introduzi-los de maneira progressiva e de forma combinada, como nos atuais aviões de caça de quinta geração (IEL/Ferreira, 2018). A estrutura de mercado desse segmento deverá apresentar apenas uma gradual mudança de posição entre as empresas líderes ao longo dos próximos dez anos. As empresas estadunidenses continuarão na liderança comercial e tecnológica, mas agora seguidas pela AVIC chinesa. Enquanto, as empresas europeias deverão perder participação por conta do relativo atraso tecnológico frente às demais concorrentes.

Estruturas de mercado com alterações pequenas: novos entrantes

O segmento de grandes *jatos comerciais* (acima de 150 assentos) está dividido praticamente ao meio, entre a estadunidense Boeing e a europeia Airbus, constituindo um clássico duopólio. A categoria inferior, de jatos comerciais entre 70 e 150 assentos, também é dominada por duas empresas, a brasileira Embraer e a canadense Bombardier, com a participação marginal da russa UAC e da chinesa AVIC. Neste segmento, os principais avanços tecnológicos devem ser incorporados de maneira progressiva em

versões mais avançadas dos modelos existentes ao longo da próxima década⁷ (IEL/Ferreira, 2018; Klotzel, 2015), como segue: (a) as novas aeronaves comerciais deverão ser produzidas através da combinação de diferentes materiais, particularmente as novas ligas metálicas e os compósitos nanoestruturados, enquanto os componentes de elevada complexidade deverão ser confeccionados através da manufatura aditiva; (b) as novas tecnologias digitais (IA e IoT) devem ser progressivamente incorporadas, possibilitando um monitoramento detalhado do desempenho das aeronaves. Neste contexto, as fabricantes de aeronaves devem adotar uma estratégia de servitização e oferecer pacotes combinados de produtos e serviços que atendam as necessidades dos clientes, particularmente aqueles relacionados com a operacionalidade das aeronaves (manutenção, passageiros e voos); (c) o processo produtivo desse segmento deve ser o mais impactado, no âmbito da indústria aeronáutica, pelas novas tecnologias, dado que as grandes escalas produtivas viabilizam a introdução de sistemas automatizados. A China está entrando neste mercado com um novo avião que incorpora diversos avanços incrementais. O modelo C919 de corredor único realizou seu primeiro voo em 2017 e deverá entrar em operação em 2021 (BBC News, 2017). Outro avião comercial de corredor único que deve entrar em operação no mesmo período é o avião russo Irkut MC-21, da UAC (Kuzmina, 2018). Além disso, ambas as empresas se uniram num consórcio, denominado *China-Russia Commercial Aircraft International Corporation* (CRAIC), para desenvolver o avião de fuselagem larga CRJ929, que deverá entrar em operação até 2028 (Goh, 2017). Por outro lado, a entrada destas novas empresas está levando a uma reação por parte da Airbus e da Boeing, que estão avançando para o segmento de aeronaves com menos de 150 assentos, através da provável aquisição dos negócios de jatos comerciais da Bombardier e da Embraer, respectivamente. Esta é uma estratégia defensiva que visa manter o predomínio do duopólio atualmente existente, de um lado, ao ocupar um segmento de alta rentabilidade e elevada expectativa de crescimento; de outro, evitar que alguma dessas empresas se associe com os chineses ou russos (Katz, 2018; Wingrove, 2017).

A estrutura de mercado do segmento de grandes *aviões turboélices de uso comercial* é composta pela empresa europeia ATR e pela Bombardier, que atuam praticamente em condições de duopólio, mas com modelos tecnologicamente defasados (AWIN, 2018). O desinteresse dos principais *players* em introduzir aeronaves mais inovadoras abre a possibilidade para a entrada de novas empresas. Neste segmento, as futuras aeronaves devem incorporar muitas das tecnologias introduzidas previamente pelos grandes jatos comerciais. Uma parcela significativa das inovações está relacionada com os materiais avançados, dado que as aeronaves comerciais turboélice atuais ainda são produzidas, quase exclusivamente, com ligas de alumínio. As tecnologias relacionadas com IA e IoT também devem ser incorporadas de maneira gradual, objetivando um melhor monitoramento e desempenho das aeronaves. Também devem ser introduzidas inovações incrementais no processo produtivo, visando à crescente automatização das unidades fabris. Com relação ao sistema de propulsão, a incorporação de motores híbridos turboelétricos deve ocorrer, mas num prazo superior a dez anos (IEL/Ferreira, 2018)⁸. Neste contexto, destaca-se a entrada da empresa chinesa AVIC, com o moderno Xian MA700, que deve ser colocado no mercado em 2022. Também existe a expectativa de que outras empresas aeronáuticas entrem neste segmento, entre elas a Embraer (Haynes, 2017).

A produção de *aeronaves de transporte militar* de médio e grande porte esteve concentrada nos EUA e na Rússia, com uma participação secundária das empresas europeias, japonesas e chinesas. Neste contexto, o impacto das tecnologias derivadas das TIC deve ser incremental e se concentrar na melhoria da navegação e nos aviônicos. Os materiais avançados vêm sendo incorporados de forma progressiva, mas não devem substituir as grandes aeroestruturas. A propulsão elétrica não deve ser introduzida nos próximos projetos de aviões de transporte militar dada a necessidade de robustez das aeronaves (IEL/Ferreira, 2018). Como resultado, observa-se que as maiores possibilidades de mudanças na estrutura

⁷ Os governos dos EUA e da Europa lançaram, recentemente, seus respectivos programas demonstradores de tecnologia, *Green Aviation* e *Clean Sky*. A partir destes dois programas, é possível identificar as futuras trajetórias tecnológicas do segmento comercial da indústria aeronáutica. No entanto, o “novo projeto dominante” da aviação comercial somente deverá estar operacional em torno de 2035 (IEL/Ferreira, 2018).

⁸ Destaca-se o projeto do avião regional de 12 lugares com tecnologia de propulsão híbrida, da estadunidense Zunum Aero, *uma start-up* que opera com o suporte da Boeing e da companhia de transporte aéreo Jet Blue (Hawkins, 2017).

de mercado para os próximos dez anos estão centradas na entrada da empresa brasileira Embraer com o inovador modelo KC-390, que se encontra em fase final de testes.

O segmento dos *aviões leves* de pequeno porte é o que apresenta a estrutura de mercado mais pulverizada da indústria aeronáutica. A baixa sofisticação tecnológica, a pequena importância estratégica e o reduzido volume de capital requerido resultaram em novos empreendimentos e diversas operações de fusões e aquisições, muitas delas comandadas por empresas de países emergentes (IEL/Ferreira, 2018). O principal impacto tecnológico se refere à crescente capacidade de armazenamento de energia das novas baterias, possibilitando motores elétricos em modelos de aeronaves já existentes. As aeronaves desse segmento também devem continuar a incorporar, de maneira crescente, os materiais avançados, assim como progredir na utilização da manufatura aditiva. Cabe ainda destacar a incorporação de algumas inovações incrementais relacionadas com as TIC, como os óculos de realidade aumentada para pilotagem das aeronaves (Ubiratan, 2014). Como resultado, observa-se atualmente a entrada de grandes empresas aeronáuticas e de motores elétricos, como a Airbus e a Siemens, que vêm utilizando este segmento para testar suas inovações e apresentá-las ao mercado, abrindo espaço para que novas empresas também entrem neste segmento ao longo dos próximos anos.

Estruturas de mercado com alterações intermediárias: novos modelos de negócios e novos entrantes

O segmento de *jatos executivos* apresenta uma estrutura de mercado bastante concentrada, dividido entre cinco grandes empresas, a francesa Dassault, a canadense Bombardier, as estadunidenses Gulfstream Aerospace e Cessna e a brasileira Embraer. As maiores mudanças na tecnologia das aeronaves estão na fabricação de aeroestruturas com materiais avançados. Com relação às inovações em IA e IoT, o destaque está na crescente integração de sensores que permitam monitorar o desempenho das aeronaves e, conseqüentemente, a realização das manutenções preditiva. A elevada capacidade de armazenamento e processamento inteligente das informações também está permitindo a constituição de sistemas de gerenciamento de grandes frotas de aeronaves executivas, possibilitando a otimização das operações. Em paralelo, o avanço das tecnologias de rede ampliará esse mercado com a difusão de programas (aplicativos) que possibilitem conectar as demandas dos clientes com as ofertas de aeronaves. O resultado deverá ser uma gradual mudança no modelo de negócio com o avanço das empresas de aplicativos na prestação dos serviços de transporte em jatos executivos, de forma customizada e personalizada (IEL/Ferreira, 2018). Além disso, constata-se que as inovações em materiais permitiram a entrada da empresa japonesa Honda, com o inovador modelo HondaJet, lançado em 2015 (Ribeiro, 2017)

A estrutura de mercado do segmento de *aviões de treinamento avançado* de alto desempenho, denominados *Lead-In Fighter Trainer* (LIFT) está concentrada em alianças estratégicas constituídas entre as grandes e médias empresas aeronáuticas para o desenvolvimento de projetos específicos (Ginader, 2013). Destaque para as alianças entre: Korea Aerospace Industries (KAI) e Lockheed Martin; Boeing e Saab; Aermacchi e Yakovlev (grupo UAC), além da chinesa AVIC que opera sozinha. Neste segmento as novas tecnologias vêm sendo incorporadas de maneira incremental, buscando reproduzir os avanços introduzidos nos aviões de caça. No entanto, os impactos mais disruptivos estão concentrados na IA, com o desenvolvimento de sistemas de treinamento virtual cada vez mais realistas, confiáveis, eficientes e baratos. Como resultado, os simuladores de voo vêm apresentando uma grande difusão e devem ocupar uma parcela cada vez maior do treinamento dos pilotos. A crescente sofisticação tecnológica faz com que seja cada vez mais conveniente a compatibilidade entre as diferentes etapas de treinamento. Em razão disso, os simuladores virtuais, os aviões de treinamento de alta sofisticação e os de treinamento básico deverão ser vendidos de forma conjunta, em pacotes de treinamento, em razão das necessidades técnicas de se uniformizar as diferentes etapas de formação dos pilotos. Ademais, uma mudança no modelo de negócio é eminente, e somente as empresas, ou consórcios de empresas, que oferecerem soluções completas e integradas deverão manter uma parcela significativa deste mercado (Leboulanger & Kimla, 2013). Existe, ainda, a probabilidade de as empresas assumirem essas atividades de treinamento militar de

forma direta ou por meio de parcerias público-privadas (PPP), vendendo serviços de formação de pilotos para uma determinada força militar ao invés da venda das aeronaves e simuladores.

Estruturas de mercado com grandes alterações: novas categorias de produtos, novos modelos de negócios e novos entrantes

A oferta mundial de VANT militares está concentrada nos EUA e em Israel, que respondem por mais de 80% das exportações dessa categoria (SIPRI, 2018), enquanto o mercado de equipamentos recreativos é dominado pelas empresas chinesas. Atualmente, a quase totalidade dos VANT em operação pode ser classificada como aeronaves remotamente pilotadas (ARP), isto é, aeronaves pilotadas pelo homem que se encontram nos centros de controle em solo. Neste sentido, as inovações mais disruptivas estão relacionadas com as tecnologias de IA e visam o desenvolvimento de VANT cada vez mais autônomos que operem sem a interferência do homem, tanto no que se refere ao controle de voo, como na execução de missões. O desenvolvimento de VANT completamente autônomos, como os modelos experimentais Northrop Grumman X-47B e Dassault nEUROn, devem avançar e atingir o nível operacional na próxima década (Yenne, 2017). Os avanços nas tecnologias de rede e da IoT também produzirão impactos disruptivos, ao possibilitar não apenas a operação autônoma dos VANT, mas também a operação conjunta e coordenada entre eles. Esta capacitação de exercer atitudes colaborativas passa a ser essencial para as operações centradas em rede (*network centric operations*) e para as operações em enxame (*swarm*) (Mehta, 2017). Os avanços nas tecnologias de armazenamento de energia também deverão promover impactos disruptivos ao possibilitar operações de VANT de médio porte com motores elétricos (IEL/Ferreira, 2018). Neste contexto observa-se que a estrutura de oferta mundial passa por dois movimentos simultâneos. De um lado, um rápido processo de concentração das categorias com tecnologias mais consolidadas. De outro lado, o intenso esforço no desenvolvimento e incorporação de novas tecnologias que deverá manter o elevado dinamismo desse segmento na próxima década, possibilitando a contínua abertura de janelas de oportunidade para novos entrantes.

Criação de um novo segmento: Veículos aéreos urbanos autônomos

Existe uma elevada probabilidade de que o impacto das inovações disruptivas resultará na criação de um novo e dinâmico segmento, que, no futuro, poderá extrapolar as próprias fronteiras da indústria aeronáutica, o denominado segmento de *veículos aéreos urbanos autônomos*. Cabe destacar que este é um segmento completamente novo que combina a fabricação de aeronaves com a prestação de serviço de transporte aéreo urbano de uso compartilhado.

De acordo com o impacto das novas tecnologias, os veículos aéreos utilizarão propulsão elétrica, devendo incorporar as mais avançadas tecnologias de armazenamento de energia. Estas aeronaves serão produzidas em materiais avançados, com a expectativa de elevado uso dos compósitos nanoestruturados. No entanto, as inovações mais disruptivas estão relacionadas com as tecnologias de IA, sensores avançados (IoT) e a segurança em redes de comunicação, pois estão sendo utilizadas para desenvolver o sistema de pilotagem autônomo que otimizem as rotas e permitam que diversos veículos compartilhem o céu, além de operarem com elevado nível de segurança (IEL/Ferreira, 2018).

A estrutura produtiva ainda é bastante incipiente, mas atualmente existem pelo menos cinco projetos que estão sendo desenvolvidos em paralelo, com elevado grau de convergência tecnológica e de modelo de negócios entre eles. Na esfera tecnológica, observa-se o desenvolvimento de uma nova categoria de aeronaves multirotores de decolagem e aterrissagem vertical, com propulsão elétrica, denominadas *Electrical Vertical Take-Off and Landing Vehicles* (EVTOL). Essas aeronaves de dois a quatro assentos deverão ter uma autonomia de voo de cerca de 30 minutos e voar numa velocidade estimada entre 50 e 100 km/h. (Tucker, 2018). A seguir uma breve descrição dos cinco projetos.

O projeto Uber Elevate, capitaneado pela Uber, empresa estadunidense prestadora de serviços eletrônicos na área do transporte privado urbano, também conta com a participação da Embraer, Bell Helicopter, Aurora Flight Sciences (grupo Boeing), Pipistrel, Mooney International Corp, além do apoio dos governos locais de Dallas e Dubai (Uber Elevate, 2016). Destaca-se ainda o decisivo suporte técnico e financeiro do governo federal dos EUA, através da NASA (Gibbs, 2017). O segundo projeto em destaque é o Vahana, que está sendo desenvolvido pela empresa A³, a subsidiária da Airbus para projetos disruptivos, constituída em 2015 no *Silicon Valley* (EUA). Cabe destacar que em janeiro de 2018, o protótipo do Vahana realizou seu primeiro voo, mas ainda não tripulado (Lovering, 2018). Outros dois projetos foram desenvolvidos por *start-ups* alemãs. A empresa Volocopter é a pioneira mundial deste novo segmento, tendo realizado o primeiro voo tripulado de um EVTOL, no ano de 2016. Essa empresa recebeu um grande aporte de recursos do grupo automobilístico Daimler e recentemente fechou uma parceria com a Intel. O modelo mais recente, o Volocopter 2X, tem capacidade para duas pessoas e, atualmente, uma versão com pilotagem autônoma está sendo testada em Dubai (Tucker, 2018). Por sua vez, a empresa Lillium, fundada em 2015, vem desenvolvendo um projeto inovador alimentado por 36 pequenos motores a jato de propulsão elétrica, ao invés de rotores. Em 2017 realizou o primeiro voo não tripulado do seu protótipo, que tem previsão para entrar em operação no ano de 2025. Por fim, o projeto mais avançado é o modelo Ehang 184, que está sendo desenvolvido pela Ehang, uma *start-up* chinesa criada em 2014. O modelo inicialmente de apenas um lugar, foi apresentado em 2016 e a partir de 2018 iniciou uma ampla série de testes de voo autônomo, muitos dos quais tripulados, além de incluir uma versão de dois lugares (Freire, 2018).

Observa-se que quatro dos cinco empreendimentos foram iniciados por *start-ups*, demonstrando a elevada capacidade das pequenas empresas de base tecnológica em avançar nas inovações disruptivas. Por outro lado, há uma tendência destas *start-ups* serem incorporadas por grandes grupos empresariais em decorrência da crescente necessidade de capital requerido por estes projetos (Utterback, 1996). Esta tendência de consolidação é corroborada pelo fato de que, atualmente, três destes cinco empreendimentos já são comandados ou contam com a decisiva participação de grandes empresas do setor aeronáutico ou automobilístico.

Especificamente com relação à tecnologia dos voos autônomos, a Uber Elevate (2016) prevê o início da operação do projeto em 2025, com a utilização dos veículos aéreos com pilotos, pois consideram que até esta data, nem a tecnologia de pilotagem autônoma estará totalmente madura, nem haverá uma certificação que permita a utilização de veículos aéreos sem piloto. Somente num médio prazo, com a própria difusão do negócio, o avanço das tecnologias envolvidas e a legislação adequada, os pilotos deverão ser gradualmente substituídos por sistemas autônomos baseados na IA, até se atingir a automação total. Por sua vez, os projetos Ehang 184, Lillium e Vahana são mais ambiciosos nesse aspecto, apostando que poderão avançar mais rapidamente na incorporação de um sistema de pilotagem autônomo (Tucker, 2018; A³ Airbus, 2018; Freire, 2018).

4. Resultados e discussão: Uma proposta de tipologia

A luz da teoria apresentada na primeira seção, observa-se que a denominada Indústria 4.0 carrega um amplo conjunto de novas tecnologias complementares e integradas – um *cluster* de *clusters* – que vem impactando o conjunto da estrutura produtiva em âmbito global, incluindo o objeto deste trabalho, a indústria aeronáutica. Um exemplo desta interdependência entre as novas tecnologias são as novas baterias, produzidas a partir de materiais inovadores, particularmente as “terras raras”, cujo uso é otimizado por softwares baseados na IA (Trigaux, 2012) Outro exemplo dessa interdependência são as modernas turbinas LEAP (GE Aviation) cujo bocal difusor é produzido através da manufatura aditiva que, por sua vez, demandou o uso de novas ligas metálicas e possibilitou o desenvolvimento de um novo projeto em uma única peça, ao invés do antigo bocal que era manufaturado a partir da montagem de 18 itens separados (Crochet, 2015).

Todos os seis *clusters* de novas tecnologias vem impactando o conjunto da indústria aeronáutica. Contudo, as modificações proporcionadas não são homogêneas e, além disso, variam de acordo com o segmento da indústria aeronáutica em que estas tecnologias que são introduzidas. Para facilitar a análise, de acordo com os conceitos utilizados em IEL/Ferreira (2018), as inovações abrangidas pelos *clusters* tecnológicos foram divididas em três categorias, considerando não apenas as mudanças atuais, mas também seu potencial de mudança até 2027: (M) moderado, as inovações devem ser muito restritas e, conseqüentemente, não devem trazer mudanças na trajetória tecnológica; (T) transformador, quando uma tecnologia for progressivamente incorporada, promovendo transformações significativas, entretanto, sem resultar numa ruptura da trajetória tecnológica; (D) disruptivo, quando existe a expectativa de que as inovações tecnológicas resultem na ruptura da trajetória tecnológica vigente.

Quadro 2 – Indústria aeronáutica: Características das novas tecnologias por segmento (2017-2027)

SEGMENTOS	TECNOLOGIAS					
	IA	Rede	IoT	PIC	MA	AE
Jatos Comerciais	T	T	T	T	T	M
Comerciais Turboélices	T	T	T	T	T	T
Jatos Executivos	D	T	T	T	D	M
Aviões Leves	T	M	M	T	T	D
Aviões de caça	D	T	T	T	T	M
Treinamento Militar	D	T	T	T	T	M
Transporte Militar	T	T	T	T	T	M
Asas Rotativas	T	T	T	T	T	M
VANTs	D	D	D	T	T	D

Tecnologias: IA (Inteligência Artificial), Rede, IoT (Internet das Coisas), PIC (Produção Inteligente e Conectada), MA (Materiais Avançados) e AE (Armazenamento de Energia),.

Conceitos sobre o mudanças tecnológicas: M (Moderado), T (Transformador) e D (Disruptivo).

Fonte: Adaptação de IEL/Ferreira (2018).

De acordo com o quadro 2, a maior parte das mudanças proporcionadas pelas das novas tecnologias tem caráter transformador e os avanços devem ser incorporadas de maneira incremental ao longo dos próximos dez anos. Esta é a situação das tecnologias relacionadas diretamente com as atividades produtivas, no caso a produção inteligente e conectada e a utilização dos materiais avançados. Contudo, observa-se que a introdução de novos materiais está promovendo um impacto disruptivo no segmento de jatos executivos, pois possibilitou que a empresa japonesa Honda conquistasse a liderança em sua categoria de mercado, com o lançamento do HondaJet produzido em compósitos. Apesar disto, a tendência é que os novos materiais sejam introduzidos de maneira gradual e passem a ser utilizados de maneira combinada, como já vem sendo feito nos aviões de caça de quinta geração.

Os avanços tecnológicos relacionados ao armazenamento de energia ainda são muito restritos, mas devem proporcionar impactos disruptivos ao longo dos próximos dez anos, pois irão alterar o sistema de propulsão e, conseqüentemente, o projeto das aeronaves nos quais forem introduzidos. No entanto, dado o

baixo grau de maturidade desta tecnologia, a propulsão elétrica deve ser introduzida e difundida apenas no segmento de aviões leves, além de ter o seu uso ampliado no segmento de VANT. Também existe a expectativa de que sejam lançados alguns modelos de aeronaves comerciais leves com propulsão híbrida, mas esta tecnologia não deve ter um impacto disruptivo neste segmento ao longo do período analisado, pois deve estar restrita a alguns modelos experimentais. Em razão disso, foi classificada, neste último segmento, como tecnologia com potencial transformador.

As inovações derivadas das TIC (IA, Novas tecnologias de redes e IoT) vem sendo introduzidas de maneira incremental em praticamente todos os segmentos da indústria aeronáutica. A expectativa é de que continuarão a ser gradualmente introduzidas, com potencial transformador em quase todos os segmentos. A exceção deverá ficar por conta da IA, cujas mudanças já vêm apresentando um caráter disruptivo em três segmentos: (i) aviões de caça, na tecnologia de interface homem-máquina; (ii) aviões de treinamento militar, por permitir o desenvolvimento de simuladores de alta eficiência e baixos custos e; (iii) jatos executivos, ao possibilitar o desenvolvimento de aplicativos que otimizem o uso destas aeronaves.

O impacto dessas novas tecnologias sobre cada segmento da indústria aeronáutica depende não apenas do potencial disruptivo das inovações, mas também da estrutura de mercado pré-existente discutida na seção anterior. Com base nestes dois aspectos, foi elaborado o quadro 3, que apresenta um resumo sobre o impacto das tecnologias da Indústria 4.0 sobre a estrutura de mercado dos diferentes segmentos que compõem a indústria aeronáutica mundial.

Quadro 3 – Estrutura de mercado da indústria aeronáutica: Características, empresas líderes, impactos das novas tecnologias e tipologia proposta (2017-2027)

Subsegmentos	Estruturas de Mercado (Características)	Empresas Líderes	Impacto das novas tecnologias sobre a estrutura de mercado		Tipologia Proposta
			Resultados atuais	Resultados até 2027	
Asas Rotativas	Alta concentração (tecnologia específica)	Airbus, Sikorsky, Leonardo e Russian Helicopter	Manunção do oligopólio existente		Sem mudanças: Manutenção da estrutura existente
Aviões de caça	Alta concentração (fronteira tecnológica)	Lockheed Martin	Avanço da AVIC (China) e da Rússia (UAC) e atraso dos europeus	Mudanças de posição dentro do oligopólio	
Jatos Comerciais	Duopólio	Boeing e Airbus	Entrada da AVIC (China) e UAC (Rússia) e contrareação do duopólio	Fim do dopólio, mas entrantes ocupam posição marginal	Pequenas mudanças: Novos entrantes
Comerciais Turboélices	Quase duopólio	ATR e Bombardier	Entrada da AVIC (China)	Poucos entrantes e estrutura de oligopólio concentrado	
Transporte Militar	Oligopólio concentrado	Airbus, UAC e Lockheed Martin	Entrada da Embraer (Brasil)	Consolidação de um oligopólio mais abrangente	
Aviões leves	Pulverizada em médias empresas	Cirrus, Grob e Cessna	Avanço das empresas dos países emergentes	Estrutura dinâmica e pulverizada	
Jatos executivos	Oligopólio concentrado	Bombardier, Gulfstream e Dassault	Entrada da Honda (Japão/EUA)	Venda de serviços de transporte executivos	Mudanças intermediárias: Novos modelos de negócio
Treinamento Militar	Alianças estratégicas	UAC, Leonardo, KAI	Fortalecimento das alianças	Venda de serviços de treinamento militar	Grandes mudanças: Novas categorias de produtos
VANTs	Estrutura pouco consolidada	General Atomics e DJI	Consolidação e janelas de oportunidade	Novas empresas	
EVTOL	Estrutura inexistente	Consórcio Uber, A3, Volocopter, Lilium e Ehang	Empresas nascentes	Expansão das empresas e entrada de novas	Novo segmento

Fonte: Elaboração própria.

Em dois segmentos os impactos das novas tecnologias sobre a estrutura de mercado são muito restritos. O segmento de asas rotativas é um oligopólio global concentrado em poucas empresas, a tecnologia é bastante específica e madura e as mudanças tecnológicas devem ter um caráter incremental. Outro segmento é o de aviões de caça, cuja expectativa é que ocorram, no máximo, algumas mudanças de posição entre as empresas já estabelecidas.

Contudo, em quatro, dos nove segmentos da indústria aeronáutica, a expectativa é que o impacto das novas tecnologias resulte em modificações na estrutura de mercado relacionadas com a entrada de novas empresas. A quase totalidade das mudanças tecnológicas que recaem sobre estes quatro segmentos possui um caráter transformador. Ainda assim, a introdução de novos projetos que incorporem e sintetizem tais mudanças abrem a possibilidade para empresas entrantes que venham acompanhar ou mesmo suplantar as já estabelecidas. A diferença de impacto entre esses quatro segmentos se refere ao nível de concentração da estrutura de mercado previamente existente. No segmento de aviões comerciais a jato, as empresas do duopólio – Boeing e Airbus – vêm adotando estratégias defensivas visando reforçar o poder de mercado frente às entrantes, de maneira que estas novas empresas ocupem apenas uma parcela marginal. Nos segmentos de aviões comerciais turboélices e de aviões de transporte militares, em que há uma menor concentração de mercado e uma tecnologia mais consolidada, a expectativa é que as empresas entrantes ocupem uma parcela significativa destes mercados. Por fim, no segmento de aviões leves, cuja estrutura de mercado é pulverizada, a expectativa é que exista um grande número de entrantes, seja através de investimentos novos ou da aquisição de empresas já estabelecidas.

Em dois segmentos, o impacto das novas tecnologias, mais especificamente da IA, deverá ser mais abrangente e propiciar o surgimento de novos modelos de negócios, centrados não mais na venda de aeronaves, mas de serviços, a denominada servitização. No segmento de jatos executivos, a venda de serviços de transporte aéreo de uso específico ou compartilhado, particularmente através de novos e abrangentes softwares (aplicativos). No segmento de aviões de treinamento militar, a venda de serviços de formação de pilotos para as forças armadas, sem que estas necessitem adquirir as aeronaves e simuladores.

No segmento de VANT, observou-se que a maioria das mudanças tecnológicas apresenta caráter disruptivo, que provavelmente conduzirão ao desenvolvimento de novas categorias de produtos e novos modelos de negócios. Como resultado desse elevado dinamismo, a estrutura de mercado continuará a apresentar dois movimentos paralelos, mas em sentidos contrários. De um lado, a concentração nas categorias de produtos já estabelecidas e, de outro, a criação de novas categorias, abrindo janelas de oportunidades para novas empresas e, até mesmo, para novos modelos de negócios.

Constata-se, por fim, que existe uma significativa probabilidade deste conjunto de novas tecnologias possibilitarem a criação de um novo segmento que estará centrado na oferta de serviços de transporte aéreo urbano de uso compartilhado, com o uso de veículos de pouso e decolagem vertical, propulsão elétrica e pilotagem autônoma (EVTOL). Apesar do atual estágio embrionário, este novo segmento poderá se consolidar, em breve, como um novo e promissor segmento de alta tecnologia que combine a fabricação dos veículos aéreos inovadores com a prestação de serviços de transporte aéreo urbano.

Considerações finais

Com base no que foi apresentado, podemos concluir que o amplo conjunto de novas tecnologias está tendo um impacto significativo – que deve se ampliar nos próximos anos – sobre a indústria aeronáutica, que alterará, de alguma maneira, a forma como a conhecemos. No entanto este impacto não é homogêneo, apresentando grandes diferenças entre os segmentos de mercado que a compõem. Estas diferenças decorrem não apenas das características das novas tecnologias que impactam um determinado segmento, mas também da estrutura de mercado pré-existente em cada um deles. É possível estabelecer que, quanto mais consolidado for um segmento, menor tende a ser o impacto das mudanças tecnológicas observadas, ao menos, no curto prazo. A relação entre a natureza das mudanças tecnológicas e a estrutura

de mercado, da maneira como a fizemos na primeira seção deste trabalho ajudam a explicar estas observações. Neste sentido, a eminente criação de um novo segmento na indústria aeronáutica que mostramos neste trabalho, também é prevista pela teoria, uma vez que as mudanças tecnológicas tem o potencial de abrir janelas de oportunidades para a conformação de novos segmentos, mediante a atuação de novos atores que não estão, necessariamente, dentro desta indústria.

Referências Bibliográficas

- A3 AIRBUS (2018) *Informações Institucionais*. Disponível em: <https://www.airbus-sv.com/>. Acessado em: 2018.
- ABERNATHY, W. UTTERBACK, J. (1978) Patterns of industrial innovation. *Technology Review*, v. 80, n. 7, p. 40-47.
- AWIN – AVIATION WEEW INTELLIGENCE NETWORK (2018) *Database*. Disponível em: <http://aviationweek.com/aviation-week-intelligence-network>. Acessado em: 2018.
- BBC NEWS (2017) China's first big passenger plane takes off for maiden flight. *BBC News*, 5 May 2017. Disponível em: <http://www.bbc.com/news/world-asia-china-39814146>. Acessado em 2018
- BERNARDES, R.C. (2007) Competitividade da indústria aeronáutica: uma comparação internacional. *ComCiência*, v. 84, p.1-3. Disponível em: <http://www.comciencia.br/comciencia/handler.php?section=8&edicao=21&id=235>. Acessado em 2018.
- BORDEAUX-REGO, A.C. (2017) *Cluster Tecnológico: Internet das Coisas*. Documento Interno de Trabalho, Projeto Indústria 2027, Rio de Janeiro: IE-UFRJ; Campinas: IE-UNICAMP.
- BRESNAHAN, T. F. & TRAJTENBERG, M. (1995) General purpose technologies ‘Engines of growth’? *Journal of econometrics*, 65, 83-108.
- CARVALHO, A.J.F. (2017) *Cluster Tecnológico: Materiais Avançados*. Documento Interno de Trabalho, Projeto Indústria 2027, Rio de Janeiro: IE-UFRJ; Campinas: IE-UNICAMP.
- COUTINHO, L.G. (1992) A Terceira Revolução Industrial e Tecnológica. *Economia e Sociedade*, Campinas, n.1, p.69-87, ago.
- CRABBE, J. (2013) Cutting edge it at Boeing: Transforming commercial aviation using WS02. *WSO2*. Disponível em: <https://wso2.com/library/wso2con2013-usa/keynote-cutting-edge-it-at-boeing-transforming-commercial-aviation-using-wso2/>. Acessado em 2018.
- CROCHET, H. (2015) 3D printing takes off withaeronautics & aerospace. *Sculpteo*, nov., v. 25. Disponível em: <https://www.sculpteo.com/blog/2015/11/25/3d-printing-takes-off-with-aeronautics-aerospace/>. Acessado em 2018.
- MEHTA, A. (2017) Pentagon Launches 103 Unit Drone Swarm. *DefenseNews*, jan, v.10. Disponível em: <https://www.defensenews.com/air/2017/01/10/pentagon-launches-103-unit-drone-swarm/>. Acessado em 2018.
- DOSI, G. (1982) Technological paradigms and technological trajectories : a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, v. 11, n. 3, junho
- DOSI, G. (1988) Sources, procedures and microeconomic effects of innovation. *Journal of Economic Literature*, v. 36, n. 3, p. 1120-1171, setembro.
- DREISSNACK, J.D.; KING, D.R. (2007). Analysis of Competition in the Defense Industrial Base. *Contemporary Economic Policy*, v. 25, n. 1, pp. 57-66.
- FERREIRA, M.J.B. (2009) *Dinâmica da inovação e mudanças estruturais: um estudo de caso da indústria aeronáutica mundial e a inserção brasileira*. Tese (Doutorado) – Instituto de Economia, Universidade de Campinas, Campinas.
- FERREIRA, M.J.B. (2012) *Competências Empresariais e Políticas Governamentais de Apoio ao Desenvolvimento do Setor Aeroespacial: Casos dos EUA*. Campinas: ABDI, NEIT-IE-UNICAMP, 2012.
- FREEMAN, C.; SOETE, L. (2008 [1997]) *A economia da inovação industrial*. Campinas: Editora da Unicamp.
- FREIRE, R. M. (2018) Ehang 184: 'drone táxi' autônomo faz primeiros testes com passageiros. *TechTudo*, 7 fev. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/2018/02/ehang-184-taxi-aereo-autonomo-faz-os-primeiros-testes-com-passageiros.ghtml>. Acessado em 2018.
- GARBEE, E. (2016) This Is Not the Fourth Industrial Revolution. Arizona State University, New America, and Slate. *Future Tense*, jan. 29. Disponível em: http://www.slate.com/articles/technology/future_tense/2016/01/the_world_economic_forum_is_wrong_this_isn_t_the_fourth_industrial_revolution.html. Acessado em 2018.
- GIBBS, S. (2017) Uber signs contract with Nasa to develop flying taxi software. *The Guardian*, nov. 8. Disponível em: <https://www.theguardian.com/technology/2017/nov/08/uber-signs-contract-nasa-develop-flying-taxi-software>. Acessado em: 2018.

- GINADER, K. Lead-In Fighter Training Considerations for 5th Generation Aircraft. Disponível em: <http://www.etcusa.com/etc-newsletter/lead-in-fighter-training-considerations-for-5th-generation-aircraft/>. Acessado em 2018.
- GOH, B. (2017) China, Russia set up wide-body jet firm in new challenge to Boeing, Airbus. *Reuters*, may 22. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-china-comac-russia-idUSKBN18I0KZ>. Acessado em 2018.
- HAWKINS, A. J. (2017) Zunum Aero, the hummingbird of the skies. *The Verge*, apr 5. Disponível em: <https://www.theverge.com/2017/4/5/15177374/zunum-aero-electric-jet-startup-stealth-boeing-jetblue>. Acessado em 2018.
- HAYNES, B. (2017) Embraer pode produzir turboélice para competir com ATR e Bombardier. *Época Negócios*, 15 set. Disponível em <https://epocanegocios.globo.com/Empresa/noticia/2017/09/epoca-negocios-embraer-pode-produzir-turboelice-para-competir-com-atr-e-bombardier.html>. Acessado em 2018.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. (2015) Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. Working Paper no. 01/2015. *Technische Universität Dortmund*. Disponível em: www.snom.mb.tu-dortmund.de. Acessado em 2018.
- IEL; FERREIRA, M.J.B. Estudo de sistema produtivo aeroespacial e defesa. Brasília: IEL/NC, 2018. 100 p. il. (Indústria 2027: riscos e oportunidades para o Brasil diante de inovações disruptivas).
- JENNINGS, G. (2017) Airbus reveals future New Fighter concept. *Jane's International Defence Review*, nov. 9 Disponível em <http://www.janes.com/article/75550/airbus-reveals-future-new-fighter-concept-1>. Acessado em 2018.
- KALLEE, S.W. (2010) Industrial Applications of Friction Stir Welding. In.: LOHWASSER, D.; CHEN, Z.(eds.) *Friction Stir Welding: From Basics to Applications*. Oxford: Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- KATZ, B. (2018) Embraer Says Boeing, Airbus Know Their Smallest Jets Are Too Big. *Bloomberg*, jan 23. Disponível em: <https://www.bloombergquint.com/onweb/2018/01/23/embraer-says-boeing-airbus-know-their-smallest-jets-are-too-big>. Acessado em 2018.
- KLINE, S.J.; ROSENBERG, N. (1986) An overview of innovation. In. LANDAU, R.; ROSENBERG, N. (eds.) *The positive sum of strategy: harnessing technology for economic growth*. Washington, DC: National Academy Press, pp. 275-305.
- KLOTZEL, E. (2015) A construção do avião do future. *AERO Magazine*, 16 de maio. Disponível em: http://aeromagazine.uol.com.br/artigo/construcao-do-aviao-do-futuro_2112.html. Acessado em: 2018.
- KUZMINA, Y. (2018) The Second MC-21-300 Took-off. 2018. *Russian Aviation*, may 21, 2018. Disponível em: <https://www.ruaviation.com/docs/3/2018/5/21/190/print/>. Acessado em: 2018.
- LEBOULANGER, A.; KIMLA, D. (2013) *Military Training & Simulation Market Spreads its Wings*. Frost&Sullivan.
- LORAL, C.A. *Cluster Tecnológico: Tecnologias de Redes*. Documento Interno de Trabalho, Projeto Indústria 2027, Rio de Janeiro: IE-UFRJ; Campinas: IE-UNICAMP, 2017.
- LOVERING, Z. (2018) Vahana's First Flight a Success. *Vahana*, 01 feb. Disponível em: <https://vahana.aero/vahanas-first-flight-a-success-ade26d26ba02>. Acesso em: 2018.
- LUNDVALL, B.Å. (2007) National innovation systems: analytical concepts and development tools. *Industry & Innovation*, v 14, n 1, pp. 95-119, feb.
- MALERBA, F. (2002) Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, v. 31, n. 2, pp. 247-264, feb.
- MAZZUCATO, M. (2012) *O Estado Empreendedor*. São Paulo: Portfolio Penguinim.
- MCKINSEY & COMPANY (2016) Industry 4.0 after the initial hype: Where manufactures are finding value and how they can best capture it. Disponível em: www.mckinsey.com. Acessado em 2018.
- MOWERY, D; ROSENBERG, N. (2005). Trajetórias da Inovação: A mudança tecnológica nos Estados Unidos da América no século XX. Campinas: Editora da Unicamp.
- NAVEIRO, R. M. (2017) *Cluster Tecnológico: Produção Inteligente e Conectada*. Documento Interno de Trabalho, Projeto Indústria 2027, Rio de Janeiro: IE-UFRJ; Campinas: IE-UNICAMP.
- NAYAK, N.V. (2014) Composite Materials in Aerospace Applications. *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 4, n. 9, sep.
- NELSON, R.R. (1995) Co-evolution of industry structure, technology and supporting institutions, and the making of comparative advantage. *International Journal of the Economics of Business*, v. 2, n. 2, pp. 171-184.
- NELSON, R.R.; WINTER, S.G. (1977) In search of a useful theory of innovation. *Research Policy*, v. 6, n. 1, pp. 36-76, jan..
- NELSON, R.R.; WINTER, S.G. (2006 [1982]) *Uma teoria evolucionária da mudança econômica*. Campinas: Editora da Unicamp.
- PENROSE, E. (2006 [1959]) *A teoria do crescimento da firma*. Campinas: Editora da Unicamp.
- PEREZ, C. (2010) Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge Journal of Economics*, v. 34, pp. 185-202.

- PRADO, E. (2017) *Cluster Tecnológico: Inteligência Artificial*. Documento Interno de Trabalho, Projeto Indústria 2027, Rio de Janeiro: IE-UFRJ; Campinas: IE-UNICAMP.
- RIBEIRO, G. (2017) HondaJet é a nova tendência mundial na aviação executiva. *AviaçãoJor*, 5 out. Disponível em: <http://aviacao.jor.br/aviacao-geral/hondajet-tendencia-aviacao-executiva/>. Acessado em 2018.
- ROSENBERG, N. (2006 [1982]) *Por dentro da caixa preta*. Campinas: Editora da Unicamp.
- SAR - Selected Acquisition Report (2018) F-35 Lightning II Joint Strike Fighter (JSF) Program (F-35): As of FY 2018 President's Budget. *DAMIR*, 2018. Disponível em: <https://fas.org/man/eprint/F-35-SAR-2018.pdf>. Acessado em 2018.
- SCHUMPETER, J.A. (1984 [1942]) *Capitalismo, socialismo e democracia*. Rio de Janeiro: Zahar.
- SCHUMPETER, J.A. (1997 [1934]) *Teoria do desenvolvimento econômico*. São Paulo: Nova Cultural.
- SCHWAB, K. 2016. *The fourth industrial revolution*. New York, Crown Business.
- SESA; FAA. (2016) *NextGen – SESAR: State of Harmonisation. Report prepared by the Coordination Committee (CCOM) for the US–EU MoC Annex 1 High-Level Committee*.
- SIPRI. (2018) *Top 100 arms-producing and military services companies*. Disponível em: <https://www.sipri.org/databases>. Acessado em: 2018.
- SIQUEIRA, R. H. M. (2014) Comparação das propriedades mecânicas de juntas de alumínio obtidas por soldagem a laser (LBW), por friction stir welding (FSW) e rebitas para aplicação em estruturas aeronáuticas. *Soldag. Insp. São Paulo*, v. 19, n. 02, pp.145-151, abr/jun .
- TORRESI, R. M. (2017) *Cluster Tecnológico: Armazenamento de Energia*. Documento Interno de Trabalho, Projeto Indústria 2027, Rio de Janeiro: IE-UFRJ; Campinas: IE-UNICAMP, 2017.
- TRIGAUX, G. (2012) *The U.S., China and Rare Earth Metals. The Future Of Green Technology, Military Tech, and a Potential Achilles. Heel to American Hegemony*. Thesis (University Honors Program), University of South Florida St. Petersburg.
- TUCKER, I. (2018) Air taxis: we have lift-off.... *The Guardian*, mar 4. Disponível em: <https://www.theguardian.com/technology/2018/mar/04/air-taxis-we-have-lift-off-airbus-vahana-ehang-voloco-uber-elevate-lilium>. Acessado em 2018.
- UBER ELEVATE. (2016) Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation. *Uber Elevate*, oct 27. Disponível em: <https://www.uber.com/elevate.pdf>. Acessado em: 2017.
- UBIRATAN, E. (2014) O futuro da aviação leve. *AERO Magazine*, 2 de outubro. Disponível em: http://aeromagazine.uol.com.br/artigo/o-futuro-da-aviacao-leve_1755.html. Acesso em: 2017.
- UTTERBACK, J. M. (1996) *Dominando a Dinâmica da Inovação*. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora.
- WEBER, A. (2015) Assembly Automation Takes Off in Aerospace Industry. *Assembly Magazine*, 4 feb. Disponível em: <https://www.assemblymag.com/articles/92790-assembly-automation-takes-off-in-aerospace-industry>. Acessado em 2018.
- WHITFORD, R. (2007) *Evolution of the Airliner*. London: The Crowood Press.
- WILSON, C. Network Centric Operations: Background and Oversight Issues for Congress. CRS Report for Congress, March 15, 2007. Disponível em: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a466624.pdf>. Acessado em 2018.
- WINGROVE, J.; TOMESCO, F.; RASTELLO, S. (2017) Bombardier Held Talks With China Over C Series. *Bloomberg*, oct 17. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-10-17/bombardier-is-said-to-have-held-talks-with-china-over-c-series>. Acessado em 2018.
- YENNE, B. (2017) *Drone Strike!: UCAVs and Aerial Warfare in the 21st Century*. Forest Lake: Speciality Press, 2017.