



Iniciativa da CNI - Confederação
Nacional da Indústria



Mapa de *Clusters* Tecnológicos e Tecnologias Relevantes para Competitividade de Sistemas Produtivos



Iniciativa da CNI - Confederação
Nacional da Indústria

Mapa de *Clusters* Tecnológicos e Tecnologias Relevantes para Competitividade de Sistemas Produtivos

Riscos e Oportunidades para o Brasil diante de Inovações Disruptivas



Brasília
2017

©2017. IEL – Instituto Euvaldo Lodi

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

IEL/NC

Superintendência IEL

FICHA CATALOGRÁFICA

I59m

Instituto Euvaldo Lodi. Núcleo Central.

Mapa de *clusters* tecnológicos e tecnologias relevantes para competitividade de sistemas produtivos / Instituto Euvaldo Lodi. Brasília : IEL/NC, 2017.

90 p. il.

1. *Clusters* Tecnológicos 2. Sistemas Produtivos I. Título

CDU: 5/6

IEL
Instituto Euvaldo Lodi
Núcleo Central

Sede

Setor Bancário Norte
Quadra 1 – Bloco C
Edifício Roberto Simonsen
70040-903 – Brasília – DF
Tel.: (61) 3317-9000
Fax: (61) 3317-9994
<http://www.portaldaindustria.com.br/iel/>

Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC

Tels.: (61) 3317-9989/3317-9992
sac@cni.org.br



Iniciativa da CNI - Confederação
Nacional da Indústria



Mapa de *Clusters* Tecnológicos e Tecnologias Relevantes para Competitividade de Sistemas Produtivos

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	7
2 O PROJETO INDÚSTRIA 2027	9
3 REFERENCIAL ANALÍTICO	13
3.1 Questões orientadoras para avaliação de Inovações Disruptivas	13
3.2 Categorias Analíticas	13
4 MAPA DOS CLUSTERS TECNOLÓGICOS E EVIDÊNCIAS SELECIONADAS DE MUDANÇA	19
4.1 Inteligência Artificial, <i>Big Data</i> , Computação em Nuvem	19
4.1.1 Caracterização	20
4.1.2 Evolução recente e prospectiva	22
4.1.3 Potencial de uso genérico das inovações	24
4.2 Redes de Comunicação	25
4.2.1 Caracterização	26
4.2.2 Evolução recente e prospectiva	31
4.2.3 Potencial de uso genérico das inovações	34
4.3 Internet das Coisas	35
4.3.1 Caracterização	36
4.3.2 Evolução recente e prospectiva	37
4.3.3 Potencial de uso genérico das inovações	38
4.4 Produção Inteligente e Conectada	41
4.4.1 Caracterização	42

4.4.2	<i>Evolução recente e prospectiva</i>	44
4.4.3	<i>Potencial de uso genérico das inovações</i>	46
4.5	Materiais Avançados	47
4.5.1	<i>Caracterização</i>	48
4.5.2	<i>Evolução recente e prospectiva</i>	50
4.5.3	<i>Potencial de uso genérico das inovações</i>	51
4.6	Nanotecnologia	53
4.6.1	<i>Caracterização</i>	54
4.6.2	<i>Evolução recente e prospectiva</i>	55
4.6.3	<i>Potencial de uso genérico das inovações</i>	57
4.7	Biotecnologia	57
4.7.1	<i>Caracterização</i>	58
4.7.2	<i>Evolução recente e prospectiva</i>	60
4.7.3	<i>Potencial de uso genérico das inovações</i>	62
4.8	Armazenamento de Energia	63
4.8.1	<i>Caracterização</i>	63
4.8.2	<i>Evolução recente e prospectiva</i>	65
4.8.3	<i>Potencial de uso genérico das inovações</i>	65
5	BALANÇO E IMPACTOS	67
5.1	Balanço	67
5.2	Impactos dos <i>Clusters</i> Tecnológicos para a competitividade dos Sistemas Produtivos	70
6	CONSTRANGIMENTOS À GERAÇÃO OU À DIFUSÃO DAS INOVAÇÕES E IMPLICAÇÕES DE POLÍTICA	73
6.1	Constrangimentos à geração ou à difusão das inovações e implicações para Políticas Públicas	73
6.2	Implicações para Políticas Públicas	75
	ANEXO: CURRÍCULOS RESUMIDOS DOS CONSULTORES E ESPECIALISTAS CONSULTADOS	77
	REFERÊNCIAS	89



1 APRESENTAÇÃO

Esta é a primeira Nota Técnica do Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil Diante de Inovações Disruptivas. Seu objetivo é estabelecer a visão prospectiva da evolução dos *clusters* tecnológicos selecionados para o estudo no período de cinco a 10 anos. Além disso, pretende fornecer subsídios para o planejamento corporativo de empresas e para a formulação de políticas públicas, visando estratégias de adaptação da indústria às melhores práticas competitivas internacionais.

No trabalho, cujos principais resultados e conclusões são apresentados adiante, detectamos as tecnologias relevantes para a competitividade da indústria brasileira e avaliamos as implicações estratégicas para empresas e ecossistemas de inovação. A segunda seção da nota, após esta apresentação, mostra os objetos de análise do Projeto Indústria 2027, com a intenção de posicionar o esforço empreendido no contexto geral da iniciativa. A terceira seção propõe o referencial analítico que guiará o exame das inovações no âmbito dos respectivos *clusters* tecnológicos e a identificação das tecnologias relevantes para a competitividade dos sistemas produtivos.

A principal contribuição desta Nota Técnica está na seção quatro, na qual são apresentados o “Mapa de *clusters* tecnológicos” e a “Síntese dos impactos esperados dos *clusters* sobre os sistemas produtivos”. A última seção discute as implicações para empresas e ecossistemas de inovação e os principais constrangimentos à geração e à difusão das inovações em cada *cluster*.

É importante salientar que o processo de elaboração do Mapa de *Clusters* Tecnológicos e de Identificação das Tecnologias Relevantes para a Competitividade dos Sistemas Produtivos encontram-se detalhados no site do projeto, uma vez que seria demasiado longa sua descrição nesta Nota Técnica.

Pensar o futuro próximo da indústria é imprescindível para tornar a economia brasileira mais próspera, forte e dinâmica. Essa é uma das missões da Confederação Nacional da Indústria (CNI). Com esse projeto, contribuímos, mais uma vez, para o crescimento econômico e o desenvolvimento do Brasil.

Boa leitura.

Robson Braga de Andrade
Presidente da CNI



2 O PROJETO INDÚSTRIA 2027

O Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil Diante de Inovações Disruptivas parte, considerando seu objetivo principal, da determinação de seus objetos de análise, que são: *Clusters* Tecnológicos e os Sistemas Produtivos com seus respectivos focos setoriais.

Os *Clusters* Tecnológicos examinados nesta Nota Técnica, em número de oito, são listados na Figura 1: Internet das Coisas (IoT), seus sistemas e equipamentos; Redes de comunicação; Computação em nuvem, *Big Data* e Inteligência Artificial; Produção Conectada e Inteligente; Bioprocessos e Biotecnologias Avançadas; Materiais Avançados; Nanotecnologias; e Armazenamento de Energia.

Os *Clusters* Tecnológicos compreendem um conjunto de tecnologias-chave agrupadas por proximidade tecnológica, de acordo com as bases de conhecimento envolvidas¹. Ademais, todos os *clusters* podem ser caracterizados como “baseados em ciência”, ou seja, são grandes saltos em determinados campos científicos que têm possibilitado custos tecnológicos cadentes e, em consequência, aplicação comercial e difusão em escalas crescentes de determinadas tecnologias. Os oito *Clusters* Tecnológicos sob análise estão listados na Figura 1:

1. Cabe considerar que não se deve estabelecer fronteiras rígidas entre os *Clusters* Tecnológicos sugeridos devido à crescente articulação entre as tecnologias-chave na geração de mudanças disruptivas nos diferentes mercados. Ressalta-se a afinidade entre eles: (1) tanto Internet das Coisas quanto Produção Inteligente e Conectada são intimamente relacionados aos *clusters* Inteligência Artificial e Redes; (2) o *cluster* Nanotecnologia poderia ser visto como um *subcluster* de Materiais Avançados, ao mesmo tempo que o *cluster* Biotecnologias também inclui algumas *nano*-biotecnologias.

Figura 1 – Clusters Tecnológicos



Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

Os Sistemas Produtivos, por sua vez, correspondem a grupos de setores industriais selecionados de acordo com sua importância para a estrutura industrial brasileira. Entretanto, dada a inevitável diversidade em termos de produtos e atividades industriais englobadas nesses sistemas, também serão examinados Focos Setoriais específicos com o objetivo de alcançar maior aprofundamento analítico e propositivo. Os principais critérios para identificação dos focos foram, pela ordem: (1) o potencial de oportunidades que poderão advir de impactos disruptivos derivados das novas tecnologias; (2) a relevância econômica do setor em termos de geração de produto, empregos, exportações e inovação. Tanto os Sistemas Produtivos quanto os Focos Setoriais estão elencados no Quadro 1:

Quadro 1 – Sistemas Produtivos e Focos Setoriais

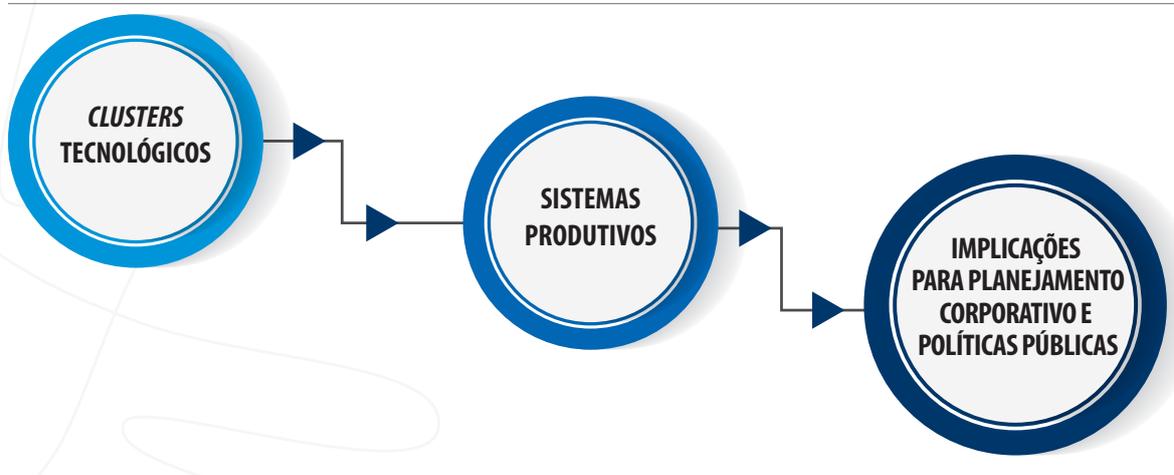
Sistemas produtivos	Focos setoriais
Agroindústrias	Alimentos processados
Insumos básicos	Siderurgia

Sistemas produtivos	Focos setoriais
Química	Química verde
Petróleo e gás	E&P em águas profundas
Bens de capital	Máquinas e implementos agrícolas Máquinas ferramenta Motores elétricos e outros seriados Equipamentos de GTD
Complexo automotivo	Veículos leves
Aeroespacial, defesa	Aeronáutica
TICs	Sistemas e equipamentos de telecom Microeletrônica <i>Software</i>
Farmacêutica	Biofármacos
Bens de consumo	Têxtil e vestuário

Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

Assim, o Projeto Indústria 2027 está construído ao longo de três etapas sequenciais (Figura 2). Na primeira, objeto desta Nota Técnica, especialistas em cada *Cluster* Tecnológico elaboraram análises sobre tendências e impactos potenciais das inovações disruptivas sobre Sistemas Produtivos. Estas reflexões servirão de insumo para a segunda etapa, quando especialistas setoriais avaliarão o processo de geração e difusão destas tecnologias em seus sistemas e focos setoriais e seus impactos sobre a competitividade empresarial. Análises de *clusters* e de sistemas produtivos servirão, então, para a reflexão sobre estratégias públicas e privadas para a transformação do sistema industrial em direção aos requisitos do novo paradigma produtivo.

Figura 2 – Etapas do Projeto Indústria 2027



Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027



3 REFERENCIAL ANALÍTICO

3.1 Questões orientadoras para avaliação de Inovações Disruptivas

A avaliação dos *Clusters* Tecnológicos buscou capturar as tecnologias-chave que tendem a introduzir mudanças disruptivas na atividade industrial. Por mudanças disruptivas compreendem-se alterações de padrões de concorrência setoriais ou de modelos de negócios atualmente predominantes. Nos horizontes temporais do projeto (cinco a dez anos), essas tecnologias podem constituir ameaças para empresas já estabelecidas. Mais importante, dados os objetivos gerais do projeto, é que também abrem um amplo leque de oportunidades trazidas pelo surgimento de novos segmentos de mercado e novas concepções nas formas de produzir e gerenciar cadeias produtivas.

Em particular, os seguintes temas foram objeto de avaliação:

- Determinação das principais tecnologias disruptivas em desenvolvimento no mundo que compõem o *cluster* tecnológico. Os desenvolvimentos tecnológicos identificados devem ser qualificados no que se refere ao horizonte temporal de uso efetivo no âmbito industrial descartando-se, portanto, desenvolvimentos com perspectiva de uso superior a 10 anos.
- Identificação dos Sistemas Produtivos e os Focos Setoriais mais potencialmente impactados pela introdução de inovações decorrentes dos desenvolvimentos identificados; avaliação da pertinência e da relevância das inovações do *Cluster* Tecnológico para cada Sistema Produtivo no Brasil.

3.2 Categorias Analíticas

Para a caracterização atual e prospectiva das inovações associadas aos *clusters* e a identificação de tecnologias relevantes para os Sistemas Produtivos foram utilizadas seis categorias analíticas, conceituadas de acordo com a literatura de economia industrial e da inovação. Estas categorias podem ser organizadas em dois grupos distintos, a saber:

- Grupo I: categorias relacionadas ao processo de inovação – natureza, contribuição e prospectiva.
- Grupo II: categorias relacionadas à adoção – tipo, espectro e intensidade do impacto.

Naturalmente, neste documento que sintetiza o exame dos *Clusters* Tecnológicos, a atenção está concentrada no primeiro grupo de categorias. No entanto, a análise realizada não se furtou a antecipar algumas conclusões tentativas a respeito das

categorias analíticas do segundo grupo, especialmente os impactos econômicos sobre os sistemas produtivos. Esses *insights* constituem hipóteses de trabalho que serão exploradas a fundo na etapa de estudos setoriais do projeto.

Grupo 1. Categorias relacionadas ao processo de inovação

Categoria 1. Natureza da inovação

A categoria Natureza da inovação abriga conceitos que descrevem o “grau de novidade” ou da carga de “inovatividade” de uma tecnologia. De fato, existem várias formas de classificar inovações (ver Garcia e Calantone, 2002). Há consenso, porém, de que as inovações podem variar num contínuo que vai de *incremental* a *radical*. Nesse estudo, foram definidas três naturezas:

- i. Inovação incremental** consiste na introdução de aperfeiçoamentos em soluções tecnológicas existentes, promovendo a melhoria de parâmetros de eficiência ou qualidade. Muitas vezes é resultado do conhecimento derivado da experiência ou de rotinas produtivas já estabelecidas.
- ii. Inovação radical** consiste em “eventos maiores e descontínuos”, ou seja, mudanças *revolucionárias* de produtos e/ou processos causadoras da “destruição criadora” da trajetória tecnológica prévia. São frequentemente resultantes de esforços de P&D.
- iii. Inovação incremental com potencial radical** consiste na inovação que está hoje em evolução incremental com uma trajetória evolutiva que indica potencial para mudanças qualitativas que podem ocorrer em partes, segmentos ou estágios das cadeias de valor, cuja acumulação pode trazer um salto descontínuo equivalente a uma inovação radical.

Categoria 2. Contribuição do Cluster

O progresso de cada *cluster* pode ser potencializado por tecnologias advindas dos demais. Assim, é relevante determinar a extensão em que tecnologias de um *cluster* são utilizadas pelos demais. Dois conceitos são, portanto, utilizados para identificar a relação entre os *clusters*:

- i. Relação instrumental geral:** quando as tecnologias de um determinado *cluster* apoiam ou são habilitadoras de inovações em todos os demais *clusters* tecnológicos.
- ii. Relação instrumental específica:** quando o apoio ou o uso das tecnologias de determinado *cluster* é restrito ao próprio *cluster* ou a *clusters* específicos.

Categoria 3. Prospectiva tecnológica (alternativas quanto às soluções tecnológicas prevalentes em dez anos, considerando incertezas técnicas e de mercado)

Esta categoria tem como objetivo captar o grau de maturidade das tecnologias em desenvolvimento nos *clusters* tecnológicos, o que contribui para a percepção de previsibilidade ou imprevisibilidade de que essas tecnologias se tornem comercialmente viáveis. São definidas três categorias:

- i. Tecnologias maduras:** tecnologias em que um padrão tecnológico já está estabelecido e seu uso em escala comercial já é consolidado. Quanto mais madura uma tecnologia na atualidade, maior a probabilidade de que ela se difunda em sistemas produtivos para os quais é relevante no horizonte de cinco a dez anos.
- ii. Tecnologias em seleção:** ainda que o uso das tecnologias tenha sido demonstrado em ambientes de aplicação e/ou ambientes operacionais, não foram estabelecidos padrões para a tecnologia e normas técnicas compartilhadas pelo(s) sistema(s) produtivo(s) de relevância – tecnologias (e padrões técnicos) estariam ainda em competição.
- iii. Tecnologias em mutação:** a viabilidade da tecnologia (subsistema tecnológico ou componentes) já foi demonstrada em laboratório ou em ambientes de uso, mas apenas de forma experimental (limitada). Assim, há incerteza quanto à efetiva dominância dessa tecnologia demonstrada, havendo alta probabilidade de que novas soluções tecnológicas alternativas sejam ainda introduzidas. Comercialização incerta, mas, se ocorrer, provavelmente se dará em mais de cinco anos.

Grupo 2. Categorias relacionadas à adoção da inovação

Categoria 4. Tipos de inovação (de acordo com a incidência na Empresa/Cadeia de Valor)

Os tipos de inovação são definidos de acordo com sua incidência na empresa ou na cadeia de valor. São identificados cinco tipos de inovação².

- i. Inovação de produto:** introdução de um novo produto em um mercado já existente ou de uma nova característica em um produto já comercializado.
- ii. Inovação de processo:** introdução de um novo método de produção para elaboração de um produto (bem final ou intermediário), seja ele novo ou já comercializado.
- iii. Inovação mercadológica:** exploração de um novo mercado ou segmento de mercado, ou seja, venda de um produto (bem final ou intermediário) em um (segmento de) mercado anteriormente não explorado.

2. A tipologia aqui utilizada para classificar as inovações é diretamente derivada do trabalho fundamental de Schumpeter, *Teoria do Desenvolvimento Econômico* (publicado em 1912 em alemão, e em 1934 em inglês).

- iv. **Inovação de matéria prima ou infraestrutura:** utilização de uma nova matéria prima ou de uma nova infraestrutura na produção de um bem final ou intermediário (incorporação no próprio bem ou no processo produtivo).
- v. **Inovação organizacional:** estabelecimento de um novo modelo organizacional (ou de negócio) para a produção de um bem final ou intermediário.

Categoria 5. Espectro (ou Amplitude vs Especificidade) de Aplicação

Esta categoria trata da transversalidade, quer dizer, da amplitude de aplicação das inovações em diferentes atividades econômicas.

- i. **“Propósito ou aplicação geral”:** quanto mais suas características se aproximem daquelas que definem uma GPT e sejam, portanto, suscetíveis de aplicação em inúmeros setores econômicos³.
- ii. **“Propósito ou aplicação específica”:** quando sua utilização ocorre somente em atividades econômicas também específicas.

Categoria 6. Intensidade do impacto das inovações (sobre estruturas de mercado, modelos de negócio e padrões de concorrência)

A identificação de tecnologias relevantes para a competitividade de Sistemas Produtivos utiliza três tipos de impactos potenciais das inovações tecnológicas sobre as estruturas econômicas dos sistemas produtivos:

- i. **Impacto moderado:** quando as inovações aumentam a competitividade das empresas por meio de maior eficiência, redução de custos, aumento de produtividade e qualidade de processos e organizações e relações entre empresas ou melhorias na relação *performance*/custo de produtos, sem intensidade, porém, para transformar as condições de concorrência. A situação prevalecente em 2017 tenderia a permanecer inalterada frente à introdução de inovações tecnológicas no horizonte de até dez anos (2027).
- ii. **Impacto disruptivo:** quando as inovações provocam mudanças que contestam o *status quo* concorrencial. Neste caso as estruturas de mercado e modelos de negócio tenderiam a se alterar intensa e rapidamente uma vez introduzidas as inovações tecnológicas com essas características.
- iii. **Impacto potencialmente disruptivo até 2027:** inovações que apresentam hoje impacto moderado que pode evoluir na direção de se tornar disruptivo no futuro. Assim, o impacto esperado da inovação tecnológica sobre a estrutura econômica do sistema em questão tenderia a ser moderado em 2017, mas com probabilidade de ruptura na estrutura econômica em 2027.

3. O conceito utilizado é derivado da literatura a respeito de “Tecnologias de Propósito Geral” (GPT, na sigla em inglês), que apresentam como característica fundamental a “Pervasividade”.

Portanto, para o Projeto Indústria 2027, o conceito de “inovação disruptiva” é utilizado somente em relação às mudanças nas estruturas de mercado das atividades econômicas e não em relação às mudanças de paradigma técnico de processo ou produto, estas sim descritas, em seu nível mais elevado, como inovações radicais.

A Figura 3 representa graficamente a intensidade dos impactos advindos dos *clusters* tecnológicos sobre as estruturas econômicas dos sistemas produtivos (eixo vertical representa a intensidade do impacto e o eixo horizontal o horizonte temporal 2017-2027).

Figura 3 – Clusters Tecnológicos



Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027



4 MAPA DOS *CLUSTERS* TECNOLÓGICOS E EVIDÊNCIAS SELECIONADAS DE MUDANÇA

O Quadro 2 representa o Mapa dos *Clusters* Tecnológicos construído com base nos itens acima apontados. Nas linhas, estão relacionadas as Categorias Analíticas, enquanto as colunas fazem correspondência ao *cluster* em questão. Nas subseções desse item 3, cada *Cluster* Tecnológico é apresentado de maneira mais detalhada quanto à sua caracterização, evolução recente e perspectiva e potencial de uso genérico. No início de cada subseção, são explicitadas, ainda, as características do *cluster* de acordo com as Categorias Analíticas de 1 a 5. A categoria 6 será melhor detalhada para todos os *clusters* na seção 5 deste documento.

Quadro 2 – Mapa dos *Clusters* Tecnológicos

	Inteligência Artificial (IA), Big Data, Nuvem	Redes de Comunicação	Internet das Coisas (IoT)	Produção Inteligente e Conectada (PIC)	Materiais Avançados (MA)	Nanotecnologia (NANO)	Biociências (BIO)	Armazenamento de Energia (AE)
<i>Tipos de inovações</i>	Inovações de processo, de produto, insumos, organizacional, infraestrutura e mercado	Inovações de produto, infraestrutura e mercado	Inovações de processo, de produto, insumos, organizacional, infraestrutura e mercado	Inovações de processo, organizacional e mercados	Inovações de produto, insumos e mercados	Inovações de produto, insumos, processos e mercados	Inovações de produto, insumos, processos e de mercados	Inovações de produto, processo e de mercado
<i>Espectro</i>	Tecnologias de propósito geral	Tecnologias de propósito geral	Tecnologias de propósito geral	Tecnologias de propósito específico a processos produtivos em qualquer atividade industrial	Tecnologias de propósito específico	Tecnologias de propósito geral	Tecnologias de aplicação específica na medicina, agroindústrias, química	Tecnologias de propósito específico para eletrificação autônoma e conservação de energia
<i>Contribuição do Cluster para os demais</i>	IoT, REDES, PIC, MA, NANO, BIO, AE	IA, IoT, PIC, AE	IA, REDES, PIC, MA, NANO, BIO, AE	MA, NANO, BIO	REDES, NANO, AE	IoT, REDES, PIC, MA, BIO, AE	MA, NANO	IoT, REDES, PIC
<i>Prospectiva</i>	Predomínio de tecnologias em mutação	Convivência de tecnologias maduras e tecnologias em seleção	Predomínio de tecnologias em mutação	Convivência de tecnologias em seleção e em mutação	Convivência de tecnologias maduras, em seleção e em mutação	Convivência de tecnologias em seleção e em mutação	Convivência de tecnologias maduras (sequenciamento) e em mutação (edição genômica)	Convivência de tecnologias maduras e em seleção
<i>Natureza da Inovação</i>	Incremental com potencial radical	Predomina incremental	Incremental com potencial radical	Incremental com potencial radical	Predomina incremental	Predomina radical	Incremental com potencial radical	Predomina incremental
<i>Intensidade do Impacto</i>	Predomina disruptivo	Predomina potencial disruptivo até 2027	Predomina potencial disruptivo até 2027	Predomina potencial disruptivo até 2027	Predomina moderado	Predomina potencial disruptivo até 2027	Predomina potencial disruptivo até 2027	Predomina moderado

Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

4.1 Inteligência Artificial, Big Data, Computação em Nuvem⁴

O *cluster* IA se encaixa nas Categorias Analíticas da seguinte forma:

- i. **Tipos de Inovação:** Inovações de processo, produto, insumos, organizacional, infraestrutura e mercado.

4. Baseado no relatório de Prado (2017).

Os algoritmos de inteligência artificial (IA) podem ser utilizados de múltiplas maneiras, tornando-se inovações de qualquer um dos cinco tipos, principalmente quando combinadas com outras tecnologias como, por exemplo: reconhecimento de imagem para diagnóstico médico (inovação de processo); eletrodomésticos conectados e inteligentes (inovação de produto); gerenciamento de desempenho de ativos e otimização de operações (inovação organizacional); robôs de entregas (inovação de infraestrutura); e “moda robótica” (inovação de mercado).

ii. Espectro de aplicação: Tecnologias de propósito geral.

As tecnologias de IA são de amplo espectro, podendo ser utilizadas tanto a jusante como a montante na cadeia produtiva; são aplicáveis a todos os sistemas produtivos analisados neste projeto de pesquisa (e além), e instrumentais para os demais *clusters*.

iii. Contribuição do Cluster para os demais: IoT, Redes, PIC, MA, Nano, BIO, AE.

A inteligência artificial é fundamental para as inovações de todos os demais *clusters*: IoT (por exemplo, nos eletrodomésticos conectados); Redes (por exemplo, soluções de cibersegurança); PIC (máquinas que fazem manutenção preditiva); MA e Nano (desenvolvimento virtual e análise das propriedades de materiais avançados ou nanomateriais); BIO (análise de dados genéticos); e AE (tomada de decisão com base na análise de dados de consumo de energia).

iv. Prospectiva tecnológica: Predomínio de tecnologias em mutação.

Existem dezenas de algoritmos de inteligência artificial, alguns mais maduros que outros, como aqueles para reconhecimento de imagens estáticas e processamento de voz. Muitos outros algoritmos estão ainda “em mutação”, como os algoritmos GAN (*Generative Adversarial Network*) e as redes neurais artificiais, cujo horizonte de utilização em escala comercial é de cinco anos.

v. Natureza da inovação: Incremental com potencial radical.

As principais inovações – algoritmos – já ocorreram e evoluem de forma incremental. No entanto, há grande potencial de se transformarem em outras inovações radicais a depender de convergências tecnológicas (combinação com tecnologias de outros *clusters*) e/ou de como essas tecnologias são utilizadas em cada um dos sistemas produtivos.

4.1.1 Caracterização

A Inteligência Artificial (IA) está associada às ciências e ao conjunto de tecnologias computacionais em que são inspiradas – mas tipicamente operam de forma bastante diferente – nas maneiras como o ser humano usa seu sistema nervoso e seu corpo para sentir, aprender, raciocinar e agir. Assim, IA reúne um conjunto organizado de conhecimentos e tecnologias (“máquinas computadorizadas”), aplicados a determinados fins: percepção, compreensão, processamento, interpretação, otimização, ação, etc. Tais tecnologias podem ser categorizadas em quatro tipos:

- i. **Máquinas computadorizadas que “pensam” como seres humanos** (p. ex., arquiteturas cognitivas e redes neurais).
- ii. **Máquinas computadorizadas que “agem” como seres humanos** (p. ex., passam pelo teste de Turing através do processamento de linguagem natural, representação de conhecimento, raciocínio automatizado e aprendizagem).
- iii. **Máquinas computadorizadas que “pensam” racionalmente** (p. ex., solucionadores lógicos, inferência preditiva e otimização).
- iv. **Máquinas computadorizadas que “agem” racionalmente** (p. ex., agentes de *softwares* inteligentes e robôs incorporados que alcançam objetivos através da percepção, planejamento, raciocínio, aprendizagem, comunicação, tomada de decisão e atuação).

Para a realização dessas máquinas são utilizadas algumas tecnologias chamadas aqui de “instrumentais”. São elas:

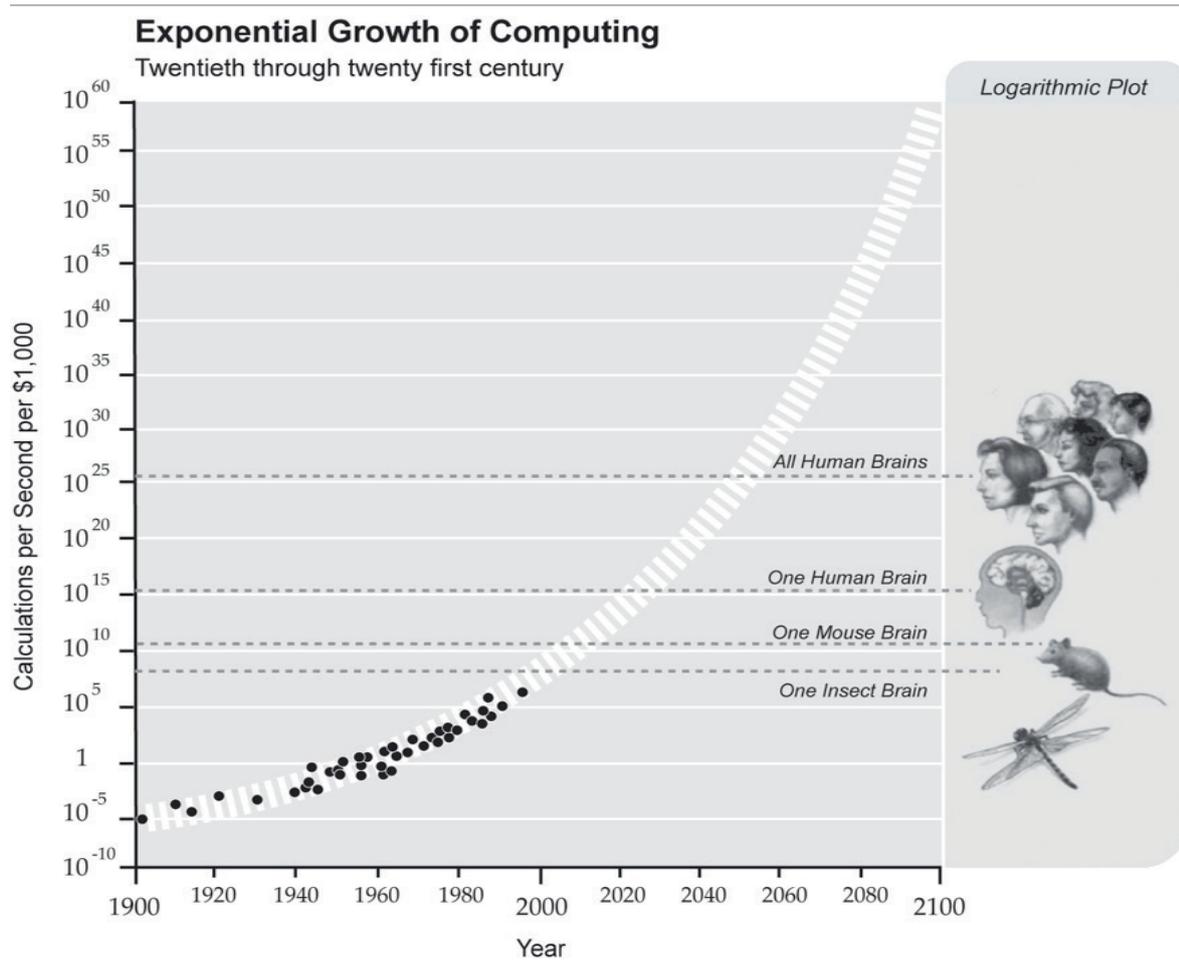
- i. **Volume de Dados (*big data*):** disponibilidade de dados estruturados (banco de dados padrão) e não estruturados.
- ii. **Recursos Computacionais:** evolução do **hardware de GPUs** (*Graphics Processing Unit*) para processamento de dados em paralelo (permite aprendizado profundo) e disseminação de serviços de **armazenamento e processamento na nuvem**.
- iii. **Dispositivos Conectados:** dispositivos conectados na *Web* e consumo de dados pelos usuários.
- iv. **Famílias de algoritmos:** Algoritmos Supervisionados, Algoritmos Não Supervisionados, Redes Neurais Artificiais, Aprendizado por Reforço (*Reinforcement Learning*), treinamento fim-a-fim dos algoritmos, redes de memória, redes GAN (*Generative Adversarial Networks*), dentre outros.

Todas estas tecnologias são combinadas e utilizadas para fins de análises de dados (*data analytics*), sejam eles *estruturados* (organizados em base de dados de tipo clássico) ou *não estruturados* (textos completos, fluxos de meta-informações, imagens, sons etc.), que podem resultar em diferentes formas de aprendizagem das máquinas computadorizadas.

4.1.2 Evolução recente e prospectiva

Em termos de *performance* das tecnologias, o que se vê é um aumento exponencial da capacidade de computação (Figura 4), indicando, prospectivamente, o potencial de se ter tecnologias de processamento computacional equivalente ao cérebro humano em meados da década de 2020.

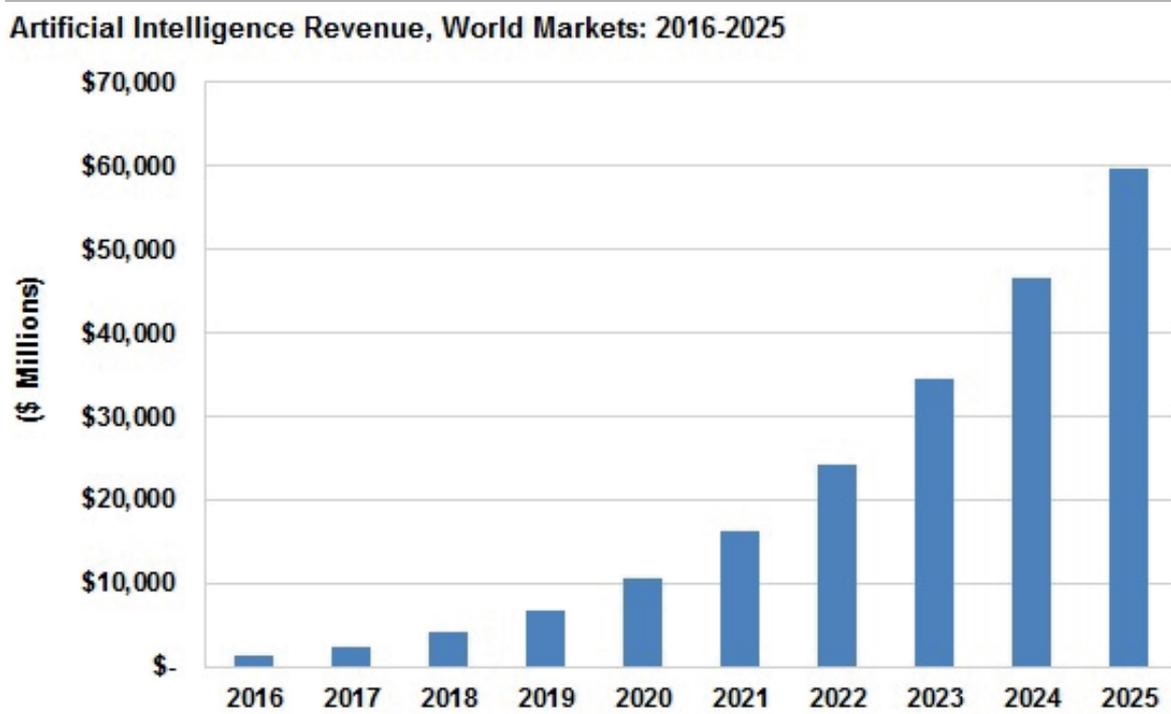
Figura 4 – Capacidade de Computação



Fonte: <http://singularity.com/images/charts/ExponentialGrowthofComputing.jpg>

Em termos de potencial de mercado (Figura 5), calcula-se que o mercado para inovações de IA alcançará receitas da ordem de USD 60 bilhões em 2025.

Figura 5 – Mercado de Tecnologias de IA



Fonte: <https://www.tractica.com/newsroom/press-releases/artificial-intelligence-software-revenue-to-reach-59-8-billion-worldwide-by-2025>

No caso de inovações radicais de IA, estima-se o seguinte horizonte de uso industrial:

- i. **GAN (*Generative Adversarial Network*):** Redes adversárias generativas, que incorporam um tipo de algoritmo de aprendizado não supervisionado, são implementadas por um sistema de duas redes neurais que competem uma contra a outra em uma estrutura de jogos de soma zero. **Estimativa: em até cinco anos.**
- ii. **Redes Neurais Evolucionárias (*Evolutionary Neural Networks*):** Redes competidoras com as redes neurais de Aprendizado por Reforço que precisam de menos dados para serem “treinadas”. **Estimativa: em até cinco anos.**
- iii. **IA Explicável (*Explainable AI*):** Endereça o problema de que a eficácia de sistemas de IA é limitada pela incapacidade atual da máquina de explicar as suas decisões e ações aos utilizadores humanos. **Estimativa: entre cinco e dez anos.**
- iv. **Simbiose Homem-Máquina (*Human-Machine Symbiosis*):** Desenvolvimento de sistemas interativos entre seres humanos e máquinas. **Estimativa: entre dez e 15 anos.**

4.1.3 Potencial de uso genérico das inovações

Os “usos genéricos” da IA podem ser divididos em quatro categorias: *data analytics* (análise automatizada de dados), *machine learning* (aprendizagem de máquina), processamento de linguagem natural (PLN), e reconhecimento de imagem.

- i. **Data Analytics:** análise de dados estruturados e não estruturados (inspeção, limpeza, transformação e modelagem para descoberta de *insights*):
 - Análise descritiva de dados históricos.
 - Análise preditiva para tomada de decisão a partir de um conjunto de dados (*big data*).
 - Análise prescritiva que tenta quantificar o efeito das diferentes possibilidades de decisões futuras (tomada de decisão estratégica).
- ii. **Machine Learning** (aprendizado a partir da análise estatística de grande volume de dados, com derivação de regras ou procedimentos explicativos e preditivos):
 - Algoritmos (clássicos) de *Machine learning* (aprendizagem de máquina) para classificação e predição de dados (inferência preditiva).
 - *Deep learning* (aprendizado profundo), categoria de aprendizado supervisionado em que dados são pré-rotulados ou ordenados e posteriormente analisados por redes neurais artificiais (RNA), constituídas de camadas profundas (ou ocultas) de “neurônios” (tipo especial de *machine learning* para reconhecimento de padrões).
 - *Reinforcement learning* (aprendizado por reforço), em que o sistema treina continuamente usando tentativa e erro, aprendendo com a experiência passada para capturar o melhor conhecimento possível para tomar decisões.
 - Aprendizado não supervisionado, em que o sistema aprende sem *input* prévio de informações (rótulos ou ordenamento).
- iii. **Processamento de Linguagem Natural (PLN)**, que trata das interações entre computadores e linguagens humanas e envolve o entendimento da linguagem, a geração da linguagem, a conexão da linguagem com a percepção da máquina, a geração de diálogos homem-máquina, entre outros. IA pode também ser utilizada para *Reconhecimento de Voz* (muitas vezes em combinação com ou parte de PLN).
- iv. **Reconhecimento de Imagem** (“visão por computador”), um tipo de reconhecimento de padrões.

Em termos mais específicos, a IA pode ser utilizada em sistemas ciberfísicos para processar e tomar decisões automatizadas, descentralizadas e autônomas (*data analytics* e *big data*), com aperfeiçoamento progressivo da técnica através de algoritmos de *deep learning* e *machine learning*. Exemplos práticos:

- **Gerenciamento de desempenho** de ativos e **otimização de operações** (por exemplo, maior segurança e acessibilidade).
- *Software* de **agendamento inteligente** (*intelligent scheduling*) adaptado à variabilidade de produção em tempo real.

- **Análise preditiva** e melhoria no gerenciamento da qualidade: (a) Predição da Demanda com Gerenciamento de Riscos; (b) Manutenção Preditiva e Regular; (c) Redução dos Custos Operacionais e de Manutenção; e (d) Maximização do Uso das Máquinas.
- Técnicas de **Aprendizagem de Máquina para inferências preditivas** a partir dos dados não estruturados (vendas, suprimentos ou chão de fábrica).
- **Navegação de robôs e controle de membros robóticos** (por exemplo, carros autônomos e robôs de fabricação).
- **Tomada de decisões através de jogos de lógica.**
- **Processamento de Linguagem Natural** para: (a) análise de sentimentos; (b) filtros de e-mail; (c) reconhecimento de voz; e (d) extração de informação.
- **Reconhecimento de padrões/imagens**, por exemplo, para diagnósticos médicos ou prevenção de catástrofes.

4.2 Redes de Comunicação⁵

O *cluster* Redes de Comunicação se encaixa nas Categorias Analíticas da seguinte forma:

- Tipos de Inovação:** Inovações de produto, infraestrutura e mercado.
Os principais tipos de inovação de redes de comunicação são de produto (redes embarcadas em produtos ou produtos conectados); de infraestrutura (redes como plataformas para integração intra e extrafirma); e de mercado (utilização de tecnologias *blockchain* para desenvolver novos mercados e/ou corrigir falhas de mercado de natureza informacional). Ao serem introduzidas comercialmente, implicam mudanças de processos e mudanças organizacionais. Estas inovações não necessariamente implicam mudanças organizacionais nos geradores de tecnologias, mas podem implicar mudanças organizacionais nos usuários de Redes de Comunicação ao demandarem novas competências.
- Espectro de aplicação:** Tecnologias de propósito geral.
As redes são tecnologias de propósito geral, aplicáveis em todos os sistemas produtivos analisados no Projeto 2027, e instrumentais para outros *clusters*.
- Contribuição do Cluster para os demais:** IA, IoT, PIC, AE.
Redes de comunicação são fundamentais para os *clusters* cujas inovações requerem conectividade: IA, IoT, PIC e AE.
- Prospectiva tecnológica:** Convivência de tecnologias maduras e tecnologias em seleção.
O *cluster* apresenta tecnologias maduras (fibra ótica, redes móveis de primeiras gerações), bem como tecnologias em seleção (novas gerações de redes móveis, novos protocolos de rede lógica, tecnologias de *fog, mist e cloud computing, blockchain e distributed ledger*). Há ainda tecnologias emergentes como criptografia quântica e Distribuição Quântica de Chaves criptográficas.

5. Baseado no relatório de Loural (2017).

v. Natureza da inovação: Predomina incremental.

Trata-se de um *cluster* que forma uma arquitetura em torno de várias tecnologias em camadas, conformando um sistema. As inovações atualmente têm caráter incremental, mas são instrumentais para inovações disruptivas (radicais), principalmente quando combinadas com outras tecnologias, a depender do sistema produtivo que as utilizam.

4.2.1 Caracterização

Uma Rede de Comunicação é um sistema de computadores, canais de transmissão e recursos relacionados e interligados para trocar informações. A rede pode ser representada conceitualmente por um modelo em camadas que abstrai os artefatos físicos envolvidos na comunicação dentro dela. A finalidade principal do modelo de camadas é separar as diferentes funções envolvidas no processo de comunicação. O modelo de camadas permite enxergar a distinção entre a rede física e a rede lógica de comunicações (Quadro 3).

Quadro 3 – Modelo OSI (Open Systems Interconnection)

Camada	Unidade de protocolo	Função	
7	Camada de aplicação	Todas as funções que não são executadas pelas camadas inferiores. Inclui tanto funções executadas por programas quanto por seres humanos.	
6	Camada de apresentação	Dado	Representação comum dos dados transferidos entre as entidades de aplicação, preservando seu conteúdo.
5	Camada de sessão		Provimento do serviço que estabelece uma sessão entre duas apresentações de modo a suportar uma troca ordenada de dados.
4	Camada de transporte	Datagrama ou segmento	Transferência de dados entre as partes (nós da rede), otimizando o serviço de rede disponível quanto ao desempenho requerido pelas sessões.
3	Camada de rede	Pacote	Provimento dos meios para estabelecer, manter e encerrar as conexões de rede entre as partes.
2	Camada de enlace	Quadro (<i>frame</i>)	Provimento dos meios funcionais e procedurais para estabelecer as conexões entre os nós da rede. Detecção e eventual correção de erros que ocorrem na camada física.
1	Camada física	<i>Bit</i>	Trata os recursos elétricos, mecânicos, funcionais e procedurais para ativar e desativar as conexões físicas para a transmissão de <i>bits</i> . As entidades da camada são interconectadas pelo meio físico (fios de cobre, fibras ópticas, ondas de rádio na atmosfera, etc.)

Fonte: Loural (2017)

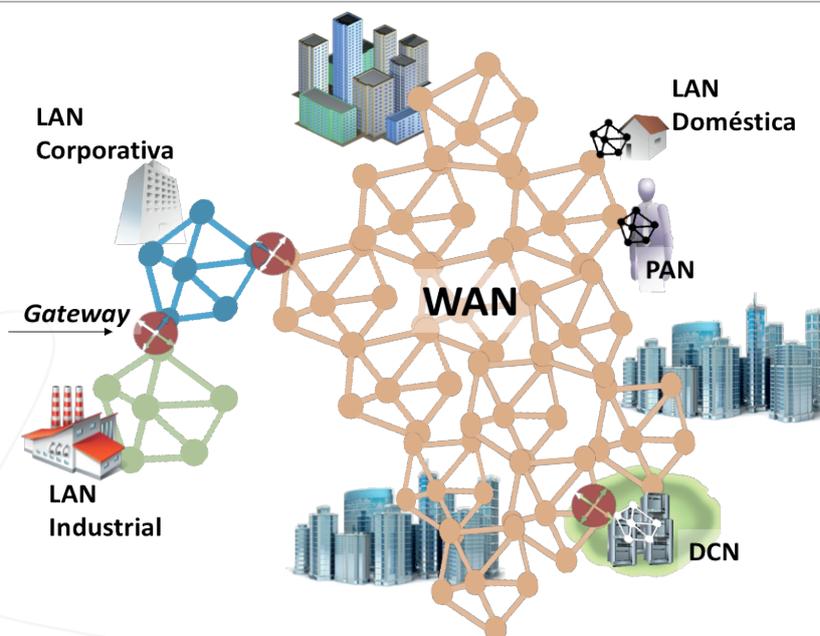
Obs.: As camadas 5-7 são associadas às “aplicações e serviços”. Acima delas está o conteúdo transportado na rede (sinais telemétricos; textos; voz e áudio; imagens; vídeos e animações)

A **Rede física** (camadas 1 e 2) corresponde ao meio físico de transmissão e aos recursos funcionais e procedurais para estabelecer conexões entre nós da rede, bem como os recursos elétricos, mecânicos, funcionais e procedurais para ativar e desativar conexões físicas para a transmissão de *bits*⁶. A **Rede lógica** (camadas 3 e 4) é constituída pelos recursos para transferência de dados entre as partes (nós da rede), otimizando o serviço de rede disponível quanto ao desempenho requerido pelas sessões e provendo os meios para estabelecer, manter e encerrar as conexões entre as partes.

As Redes de Comunicação podem ser classificadas em dois tipos quanto à sua abrangência geográfica, que se decompõem em subcategorias (ver Figura 6):

- i. Redes locais: LAN (*Local Area Networks*), normalmente envolvendo apenas enlaces privados ou restritos. As redes industriais mais comuns são as *Industrial LANs*:
 - Subcategoria: *Data Center Networks* (DCN).
 - Subcategoria: *Personal Area Networks* (PAN), redes pessoais que conectam diferentes dispositivos inteligentes.
- ii. Redes amplas/regionais: WAN (*Wide Area Networks*), que envolvem enlaces de redes de telecomunicações públicas, enlaces alugados às operadoras concessionárias dos serviços ou mesmo enlaces privados. Podem ser compostas através da ligação de LANs dispersas:
 - Subcategoria: *Metropolitan Area Networks* (MAN).

Figura 6 – Representação pictórica da taxonomia de redes



Fonte: Loural (2017)

6. Cabe ressaltar que as conexões principais são chamadas de *backbones* e são consideradas estratégicas. Para que o fluxo de dados não sofra interrupções ou bloqueios, são utilizadas rotas redundantes, rotas alternativas (próprias ou de operadoras diferentes), equipamentos em *back up* entre outros.

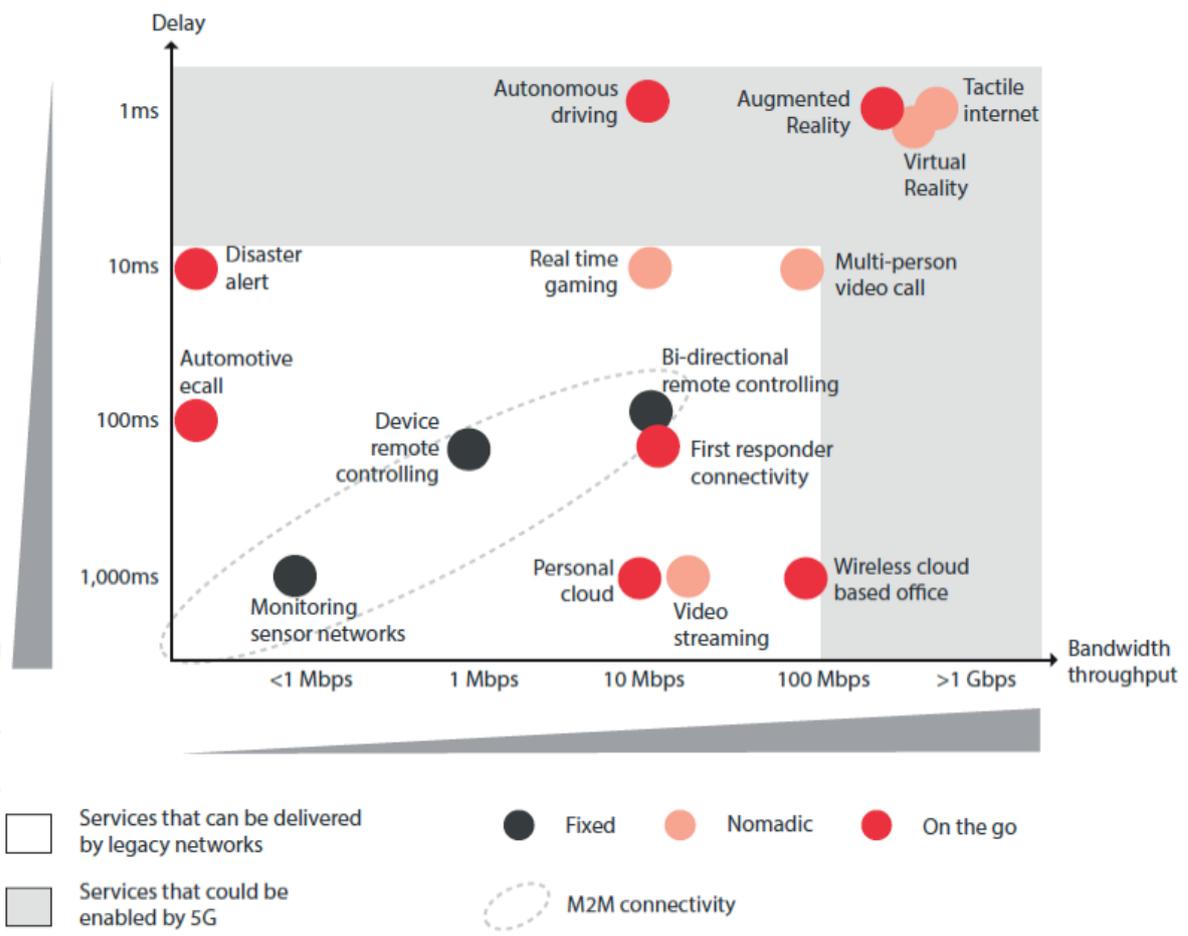
As tecnologias necessárias para as Redes de Comunicação incluem:

- i. **Tecnologias de comunicação sem fio** (*wireless*): instrumentais para a rede física.
- ii. **Tecnologias de fibras óticas**: instrumentais para a rede física.
- iii. **Tecnologias de *networking***: instrumentais para a rede lógica. Incluem **protocolos**, que são um conjunto de regras (implementados em *hardware*, em *software*, ou ambos) que governam a comunicação entre os nós: regras de sintaxe, de semântica, de endereçamento, de prioridade, de segurança, de correção de erros, entre outras. Entre as tecnologias mais relevantes para o escopo deste trabalho, pode-se destacar:
 - Protocolos TSN (*Time Sensitive Networking*): protocolos que asseguram comportamento da rede em tempo real e determinístico para ambientes fabris.
 - Tecnologia SDN (*Software Defined Networking*), que permite a separação entre *hardware* e *software* (protocolos): separação entre a lógica de controle (o “plano de controle”) dos roteadores e *switches* que encaminham o tráfego (o “plano de dados”).
 - Tecnologia NFV (*Network Function Virtualization*), que permite desacoplar o equipamento físico na rede das funções executadas por ele. Em manufatura avançada, habilitam novas oportunidades para a produção flexível e para a administração dos serviços de rede na fábrica e na empresa em geral.
- iv. **Fog e mist computing**: processamento da informação próximo à borda da rede e nos dispositivos acoplados a sensores, respectivamente. A rigor, trata-se mais de uma arquitetura de rede e de processamento de informação do que uma tecnologia em sentido estrito.
- v. **Blockchain e distributed ledger**: banco de dados distribuído que guarda uma série de registros (de transações, por exemplo) e coloca-os em um bloco, que é então “encadeado” para o próximo bloco, usando-se uma assinatura criptografada. Isso permite que essa cadeia de blocos seja usada como um livro-razão (*ledger*), o qual pode ser compartilhado e corroborado por qualquer pessoa com as permissões apropriadas. É tido como tecnologia de registro permanente e inviolável.
- vi. **Criptografia quântica** ou Distribuição Quântica de Chaves (*Quantum Key Distribution* – QKD): assegura a distribuição de chaves criptográficas entre duas partes distantes com segurança absoluta, garantida por leis fundamentais da Física, ainda imatura, mas talvez em uso difundido em dez anos (já há empresas explorando comercialmente a criptografia quântica nos EUA, Europa e Austrália).
É importante entender os quatro principais parâmetros de desempenho de uma rede de comunicação, pois se tratam de variáveis mais ou menos fundamentais a depender do uso que se faz da tecnologia:
 - i. **Vazão** (*throughput*), **banda passante** ou **taxa de dados**: vazão ou taxa de *bits* (*bit rate*) ou taxa de dados entre dois pontos ou nós que se comunicam é o número de *bits* que a rede é capaz de aceitar e entregar por unidade de tempo.

- ii. **Atraso de trânsito (*delay*) ou latência da rede:** intervalo de tempo entre a emissão do primeiro *bit* de um bloco de dados pelo nó transmissor e sua recepção pelo nó receptor.
- iii. **Variação do atraso (*jitter*):** medida de quanto o atraso varia em torno de um valor característico como consequência das variações estatísticas no comportamento dos equipamentos de transmissão e recepção.
- iv. **Taxa de erro (*error rate*) na transmissão:** medidas do comportamento da rede quanto à alteração, perda, duplicação ou entrega de dados fora de ordem.

Tais parâmetros de desempenho servem, entre outras funções, para indicar a viabilidade técnica de uma outra aplicação. Por exemplo, alguns usos se tornam possíveis apenas com a quinta geração de redes sem fio (tecnologia GSM 5G) (Figura 7), tais como carros autônomos e ambientes de realidade aumentada. As tecnologias sem fio hoje existentes não apresentam características para suportar tais aplicações.

Figura 7 – Banda passante e latência de potenciais casos de uso 5G



Fonte: GSMA INTELLIGENCE (2014)

Em linhas gerais, as diferentes redes de comunicação apresentam requisitos técnicos específicos para sua adoção:

i. Redes sem fio:

- Os requisitos para redes locais industriais, que muitas vezes requerem aplicações com processos críticos em termos de atraso e controle em tempo real, estão ligados à **baixa latência de transmissão, baixo jitter/forte determinismo** (repetição do intervalo de resposta) e **confiabilidade** (também sincronismo), o que pode ser alcançado pela combinação de tecnologias sem fio atuais com a arquitetura *fog computing*, sem que se faça imprescindível a chamada 5ª geração das comunicações móveis (5G). Pode-se antever uma guerra de padrões com a evolução incremental das tecnologias existentes dentro dos seus *roadmaps*.
- Na conectividade de produtos também se prevê uma guerra de padrões (tanto proprietários quanto abertos, usando frequências liberadas e reguladas). O foco são as redes de baixo consumo de energia e longo alcance, as LPWA (*Low Power, Wide Area*). Considerando-se o tempo para padronização, teste, adoção e amadurecimento de novas tecnologias de rede, pode-se prever uma convivência entre várias alternativas ao longo dos próximos anos.

ii. Redes óticas:

- Domínio da tecnologia e aproveitamento de gerações anteriores levarão a sistemas de alta capacidade e baixo custo. Portanto, não se antevê gargalos para a difusão de redes óticas locais (LAN) e de longa distância (WAN) no horizonte 2027.
- O desafio da próxima década, do ponto de vista de P&D, é desenvolver tecnologias para lidar com a ameaça do “esmagamento de capacidade” (*capacity crunch*) no futuro. Apesar da enorme capacidade de vazão do tráfego de dados numa fibra óptica, ela não é infinita. Há limites para essa capacidade e, talvez, novas tecnologias sejam necessárias para atender à demanda a um custo por *bit* razoável (não existem estimativas de quando se chegará ao limite teórico). Resultados dessa linha de P&D podem ser aproveitados na próxima década, mas não devem afetar substancialmente o cenário de evolução incremental.

iii. Redes lógicas:

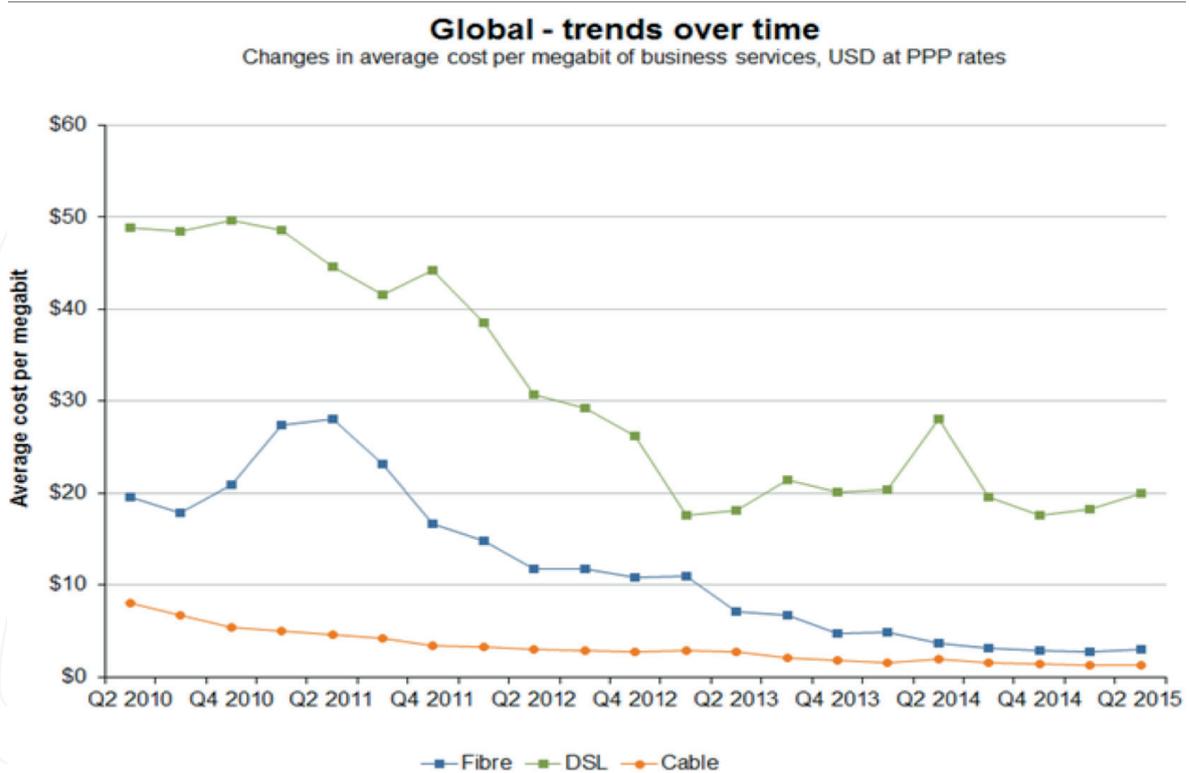
- Desenvolvimento de protocolos para endereçar gargalos das redes sem fio.
- Otimização e redução de consumo de energia das redes por meio não só de *hardware*, como também por meio de algoritmos de *software* de encaminhamento – *green networking* ou *green communications*.
- Segurança de informação e comunicação, através de segmentação de redes, isolando trechos para minimizar o fluxo de ameaças e facilitando a instalação de *firewalls* de forma distribuída, além, é claro, do uso de técnicas criptográficas e boas práticas de segurança.

4.2.2 Evolução recente e prospectiva

Para exemplificar a evolução recente e prospectiva das tecnologias de redes de comunicação, apresentamos dois indicadores (Figuras 8 e 9): custos de assinatura de serviços de rede para uso comercial e difusão das tecnologias de rede sem fio (GSM). O que se vê é (1) queda no custo dos serviços de rede para todas as tecnologias de rede física e (2) difusão acelerada das tecnologias de rede sem fio, mesmo que a tendência seja de que no início da década de 2020 ainda prevaleçam as conexões baseadas em tecnologia de terceira geração (3G) e que somente por volta de 2030 a tecnologia 4G-LTE atinja seu pico de penetração no mercado mundial.

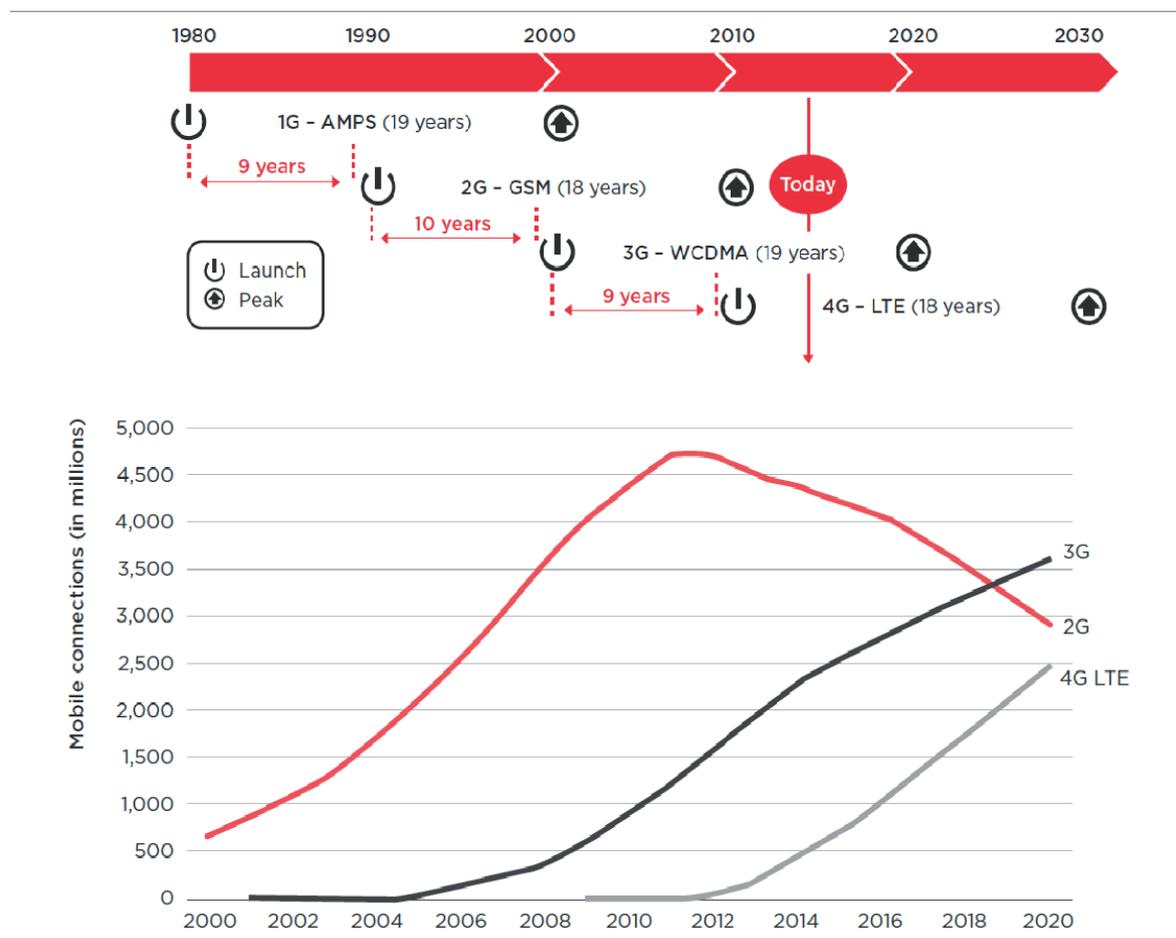
Para as diversas tecnologias de redes de comunicação, o grau de adoção no horizonte de até dez anos é divergente, a depender de gargalos de natureza técnica ou não (ver sessão 5.2 sobre os constrangimentos à adoção de tecnologias). O Quadro 4 traça um cenário provável para as tecnologias mais relevantes.

Figura 8 – Custos de serviços Redes de Comunicação para uso comercial



Fonte: <http://point-topic.com/free-analysis/broadband-tariff-trends-over-time-q2-2010-to-q2-2015/>

Figura 9 – Evolução das gerações tecnológicas



Fonte: GSMA INTELLIGENCE (2014)

Quadro 4 – Evolução prospectiva: desenvolvimento de tecnologias de rede no horizonte temporal de até dez anos

Área	Tecnologias	Grau de adoção no horizonte de cinco anos	Grau de adoção no horizonte de cinco a dez anos	Comentários
Comunicações sem fio	5G	Nenhum a pequeno	Pequeno a médio	Desafios técnicos ainda pendentes. Especificação por ser publicada.
	LTE	Médio a grande	Grande	Ver figura 9.
	Redes WLAN industriais	Pequeno a médio	Grande	Coexistência de padrões. Convergência mais rápida por pressão industrial.
	Redes LPWA	Pequeno	Médio a grande	Coexistência de padrões. Convergência dificultada por vários interesses no cenário de IoT além da indústria. Podem surgir questões regulatórias por causa do uso do espectro.

Área	Tecnologias	Grau de adoção no horizonte de cinco anos	Grau de adoção no horizonte de cinco a dez anos	Comentários
Comunicações ópticas	Redes ópticas industriais	Médio	Médio	Estável. Grau pode ser alterado caso haja maior pressão pelo uso de aplicações de vídeo no ambiente de produção.
	Tecnologia WDM	Grande	Grande	Grande, mas restrito ao mercado de operadoras e provedoras de rede WAN.
	Tecnologia SDM	Nenhum	Nenhum a pequeno	Ainda não há visão clara sobre o horizonte de demanda. Hoje, ainda em estágio laboratorial.
	Redes DCN	Médio a grande	Grande	Esteio das interconexões dos <i>datacenters</i> futuros.
Networking	Redes/ protocolo TSN	Médio a grande	Grande	A pressão da indústria deve ser no sentido de incorporação crescente em novas instalações.
	SDN/NFV	Pequeno a médio	Médio a grande	Crescente em WAN. Podem vir a ser objeto de interesse das grandes empresas de <i>software</i> .
	Redes verdes	Pequeno a médio	Grande	A penetração pode ser lenta, mas há pressão tanto de governos quanto da opinião pública sobre questões ambientais.
Segurança	<i>Frameworks</i>	Médio a grande	Grande	Praticamente obrigatório. Cresce com a conscientização das empresas. <i>Frameworks</i> ficam mais sofisticados. Automatização de práticas em sistemas de <i>software</i> de segurança.
	<i>Firewall</i> distribuído	Pequeno a médio	Médio a grande	Cresce com a conscientização das empresas. Importante na digitalização da manufatura.
	<i>Blockchain</i>	Pequeno	Médio a grande	Depende da construção de confiança na tecnologia e no desenvolvimento de sistemas aplicados ao contexto industrial.
	Criptografia quântica	Pequeno	Pequeno	Sofisticada, restrita a nichos. Ainda precisa vencer o desafio de ser aplicada em redes de vários nós.

Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

4.2.3 Potencial de uso genérico das inovações

Como as Redes são de uso genérico, isto implica e demanda quantidade crescente de informação transmitida, com segurança, rapidez e confiabilidade. Em geral, identificam-se cinco formas de uso das Redes de Comunicação na indústria:

- i. Redes em produtos finais, distinguindo-se dois casos:** (a) as redes diretamente embarcadas no produto (conectividade necessária para operação, como em aviões); e (b) a agregação ao produto apenas da função de conectividade à rede (para alerta de manutenção e/ou rastreabilidade).
- ii. Redes no processo de produção,** que permitem sistemas ciberfísicos para supervisão, controle, acionamento etc., bem como para sistemas de manufatura reconfigurável (para customização da produção).
- iii. Redes na organização da empresa,** que levam à convergência entre Tecnologias da Informação e Tecnologias de Operação no ambiente fabril.
- iv. Redes na organização da cadeia produtiva,** a montante e a jusante, através de Redes na organização da cadeia produtiva, a montante e a jusante, por meio da extensão do conceito de *Electronic Data Interchange* e adoção de tecnologia *blockchain*.
- v. Redes no ciclo de vida do produto,** para monitoração do produto, rastreabilidade (por exemplo, por meio de *blockchain*) e contribuição para habilitar a reciclagem.

Além disso, redes de comunicação são **habilitadoras para a chamada “servitização”**, isto é, para a combinação de serviços com produtos nas ofertas das empresas ao mercado.

Cada sistema produtivo utiliza mais ou menos cada tipo de aplicação de redes de comunicação, por exemplo:

- i. Produtos com rede embarcada:** automotivo, aeronáutico, bens de capital (sistemas integrados).
- ii. Supervisão e controle de processos fabris:** praticamente todos os setores; o grau de impacto depende da natureza e da criticalidade das operações. Destaques para petróleo & gás, química, automotivo, aeroespacial.
- iii. Integração intrafirma:** todos os setores.
- iv. Integração da cadeia de fornecedores:** automotivo, aeronáutico, bens de capital, agroindústria.
- v. Produtos conectados (rastreabilidade, ciclo de vida dos produtos):** automotivo, aeronáutico, bens de consumo (duráveis ou não), farmacêutico, alimentos processados.

4.3 Internet das Coisas⁷

O *cluster* Internet das Coisas se encaixa nas Categorias Analíticas da seguinte forma:

- i. Tipos de Inovação:** Inovações de processo, produto, insumos, organizacional, infraestrutura e mercado.
Em geral, nas atividades industriais usuárias de IoT, prevalecerão inovações de processo com potencial de induzir inovações organizacionais (inclusive novos modelos de negócio) e de abrir novos mercados. Inovações de produto por vezes são possibilitadas como consequência das inovações de processo e organizacionais (mas não somente). Mas a Internet das Coisas apresenta todos os tipos de inovação: processos onde máquinas e equipamentos, bens de consumo e pessoas estarão conectados em redes inteligentes, viabilizando muitos campos de aplicação: por exemplo, sistemas capazes de executar manutenção preditiva (inovação de processo); eletrodomésticos conectados e inteligentes (inovação de produto); sensores para gestão e organização da cadeia produtiva e de logística (inovação organizacional); clientes utilizando produtos conectados (inovação de mercado); pessoas utilizando sensores/monitores de sua saúde conectados a sistemas de medicina personalizados.
- ii. Espectro de aplicação:** Tecnologias de propósito geral.
A Internet das Coisas apresenta tecnologias de propósito geral (alta diversidade de serviços inovadores potencializados pelo *cluster*), aplicáveis às diferentes indústrias, cada uma dela podendo valer-se de diferentes tipos de sensores para fins específicos. Existem atividades industriais que demandarão tecnologias, produtos e serviços em IoT para aprofundar os níveis de automação com consequente impacto positivo sobre a produtividade, como é o caso das indústrias de produtos discretos (aviação, veículos, máquinas de bens de capital, entre outros). As atividades industriais associadas às TICs, além de se beneficiarem da melhora dos processos fabris, serão ofertantes de tecnologias, produtos e serviços para outros setores e/ou mercados que incorporam IoT.
- iii. Contribuição do Cluster para os demais:** IA, Redes, PIC, MA, Nano, BIO, AE.
As inovações de IoT são utilizadas por todos os demais *clusters*, pois máquinas e equipamentos conectados e inteligentes são instrumentais para suas aplicações.
- iv. Prospectiva tecnológica:** Predomínio de tecnologias em mutação.
Trata-se de um *cluster* tecnológico relativamente novo, cujas tecnologias, portanto, estão em mutação; prevalecem incertezas em relação a interoperabilidade, padronização técnica de comunicação e tecnologias de segurança de dados.
- v. Natureza da inovação:** Incremental com potencial radical.
Ainda que as inovações de IoT surjam inicialmente como incrementais, elas possuem potencial para se tornar inovações radicais a depender de convergências tecnológicas (combinação com tecnologias de outros *clusters*) e ou de como essas tecnologias são utilizadas em cada um dos sistemas produtivos.

7. Baseado no relatório de Bordeaux Rego (2017).

4.3.1 Caracterização

A “Internet das Coisas” – em inglês *Internet of Things* (IoT) – pode ser definida como um sistema de interconexão, através da Internet ou de uma rede específica, de dispositivos informáticos incorporados em objetos cotidianos, permitindo-lhes enviar e receber dados, e atuar sobre estes objetos. Sensores e atuadores microeletrônicos gerando dados e atuando são o *backbone* ou “sistema nervoso central” de qualquer solução de IoT; trata-se da principal tecnologia instrumental de IoT (mas há outras, como tecnologias de *Big Data*, *Analytics* e IA). Os sensores podem ser tipificados em:

- 1) Grandes sensores industriais.
- 2) Primeira geração de sensores.
- 3) Geração avançada de sensores.
- 4) Sensores integrados.
- 5) Sensores *swarm* (enxame).
- 6) Sistemas politrônicos.
- 7) Eletrônica impressa.

IIoT é a Internet das Coisas Industrial (*Industrial Internet of Things*), usualmente aplicada para extração e análise de dados e tomada de decisão. A IIoT implica capacidade de monitorar e controlar todas as ferramentas de produção e usar dados coletados para aumentar produtividade e melhorar qualidade de processos.

A IoT é, assim, um sistema do qual fazem parte diversas camadas de aplicação, sistemas de dados (inclusive tratamento através de algoritmos de IA), *softwares*, redes de comunicação, componentes semicondutores e infraestrutura de *hardwares*, sem as quais os objetos são apenas “coisas”. Tal qual as redes de comunicação, o sistema de IoT pode ser representado através de uma arquitetura em camadas. Os requisitos de rede, como por exemplo largura de banda e tempo de resposta, bem como as necessidades de armazenamento, são específicos em cada camada.

- i. **Camada de Aplicação:** Plataformas de Aprovisionamento dos Serviços – sistemas de gestão de processos que permitem aprovisionar serviços e gerenciar relações de aplicações específicas com clientes dos serviços (pessoas, empresas ou indústrias e governos).
- ii. **Camada de Armazenamento e Tratamento de Dados:** composta de sistemas de análise (*data analytics*, *big data*), sistemas cognitivos (*Inteligência Artificial*, *Machine Learning*), agregação de dados, computação em nuvem, virtualização de sensores, segurança e privacidade de *softwares*, para tratamento das informações coletadas.
- iii. **Camada de Gateways (também conhecida como *Edge Computing* ou *Fog Computing*):** *Gateways* para concentração de dados das redes de sensores e atuadores – *Sensor Network* (recepção da comunicação, tratamento e processamento) –, interconexão com a Internet Pública e/ou sistemas públicos de telecomunicação, e também

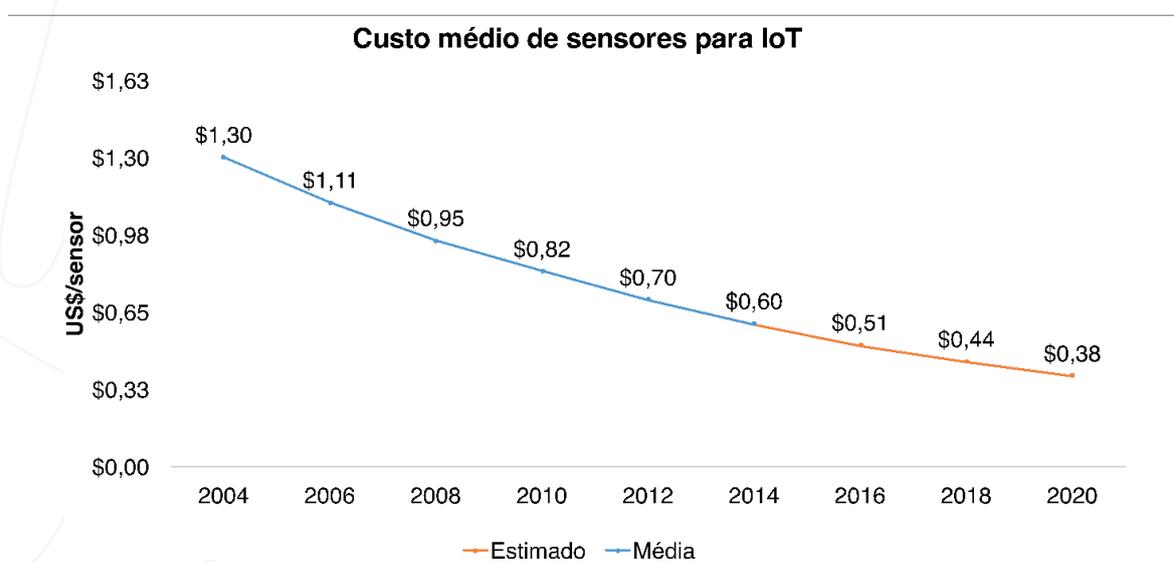
tradução da informação de redes legadas para o padrão estabelecido. Além de agregarem dados, estes agentes são dotados de uma certa inteligência, capazes de atuar de maneira autônoma para prover parte dos serviços mais imediatos que exigem ações *on-line* e baixa latência.

- iv. **Camada de Redes de Comunicação de Sensores – *Sensor Network*:** composta de redes de rádio em geral, e também na indústria fabril de redes cabeadas (ópticas e metálicas), com arquiteturas flexíveis de baixo custo, baixo consumo energético, auto-organizadas, redes programáveis por *software*, redes virtualizadas, tecnologias de segurança e privacidade, entre outras tecnologias.
- v. **Camada de Dispositivos – Sensores e Atuadores ou coleta de dados:** composta de sensores e atuadores para a coleta de informações e ação dos objetos: *energy harvesting*, nanotecnologia, micro e nanoeletrônica, biotecnologia, fotônica, sistemas embarcados, segurança e privacidade, entre outras.
- vi. **Camada Transversal de Segurança da Informação:** Composta por tecnologias utilizadas para garantir a privacidade e a segurança (*security*) no envio de dados que permearão todas as demais camadas. Em todas as camadas horizontais são exigidos robustos mecanismos de segurança, dado que uma invasão maliciosa poderá literalmente parar o sistema de IoT.

4.3.2 Evolução recente e prospectiva

Um dos fatores mais importantes para a difusão do *cluster* de IoT é a trajetória cadente dos custos dos sensores. De acordo com as estimativas da Goldman Sachs, de cerca de USD 1,30 em 2004, o custo médio previsto para esses sensores será de USD 0,38 por sensor (Figura 10).

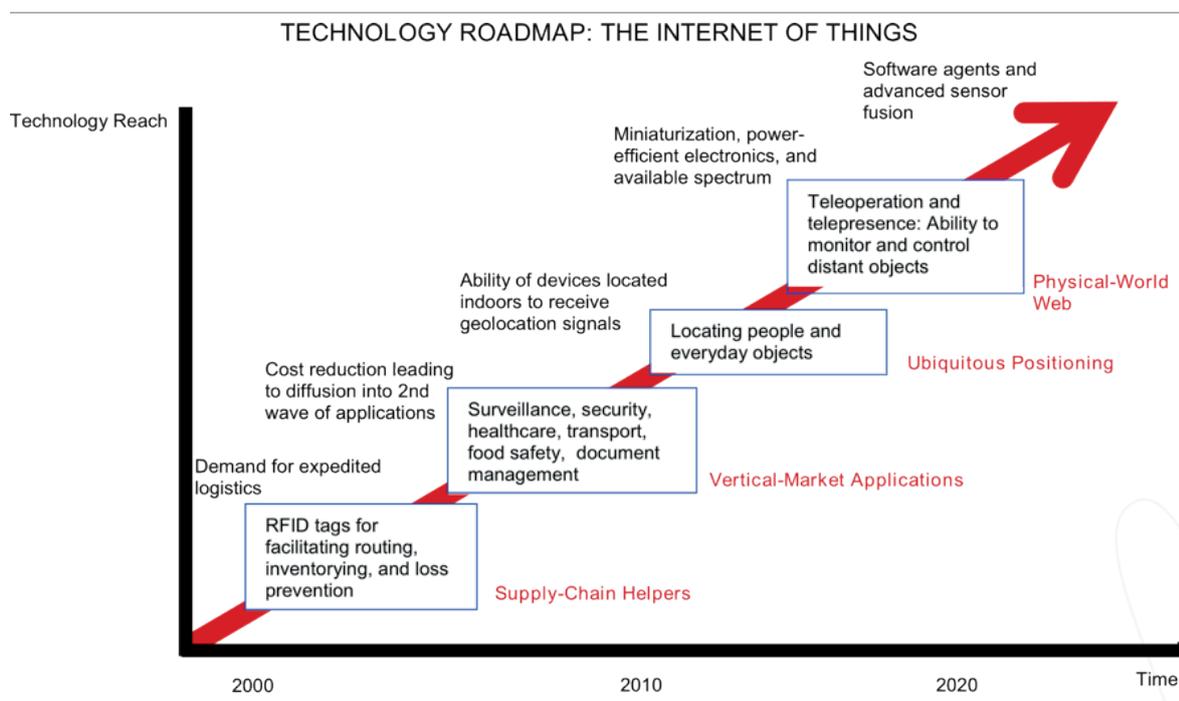
Figura 10 – Evolução das gerações tecnológicas



Fonte: Goldman Sachs, BI Intelligence Estimates

As consultorias internacionais e empresas estimam que em 2020 serão de 18 bilhões (estimativa IHS) a 50 bilhões (estimativa Cisco e Ericsson) de dispositivos (“coisas”) conectados, de um nível estimado de seis a 14 bilhões em 2014. O Grupo McKinsey estima que, em 2025, estarão conectados 35 bilhões de dispositivos, ou cinco vezes a população mundial. Em termos de receita, o mercado de IoT está estimado entre USD 1 e USD 7 trilhões em 2020, representando crescimento anual acumulado de 13% a 33%, dependendo da fonte da estimativa. O impacto econômico deste mercado poderia chegar a até duas vezes o total de receita do mercado. A Figura 11 ilustra o potencial de difusão dos diferentes usos de IoT:

Figura 11 – Principais tecnologias em uso e em desenvolvimento para uso em 5-10 anos: tipos de casos de uso vs. alcance



Fonte: SRI Consulting Business Intelligence.

4.3.3 Potencial de uso genérico das inovações

No caso do *cluster* IoT, dois são os principais casos de uso genérico (para uso industrial, principalmente, mas também para bens de consumo):

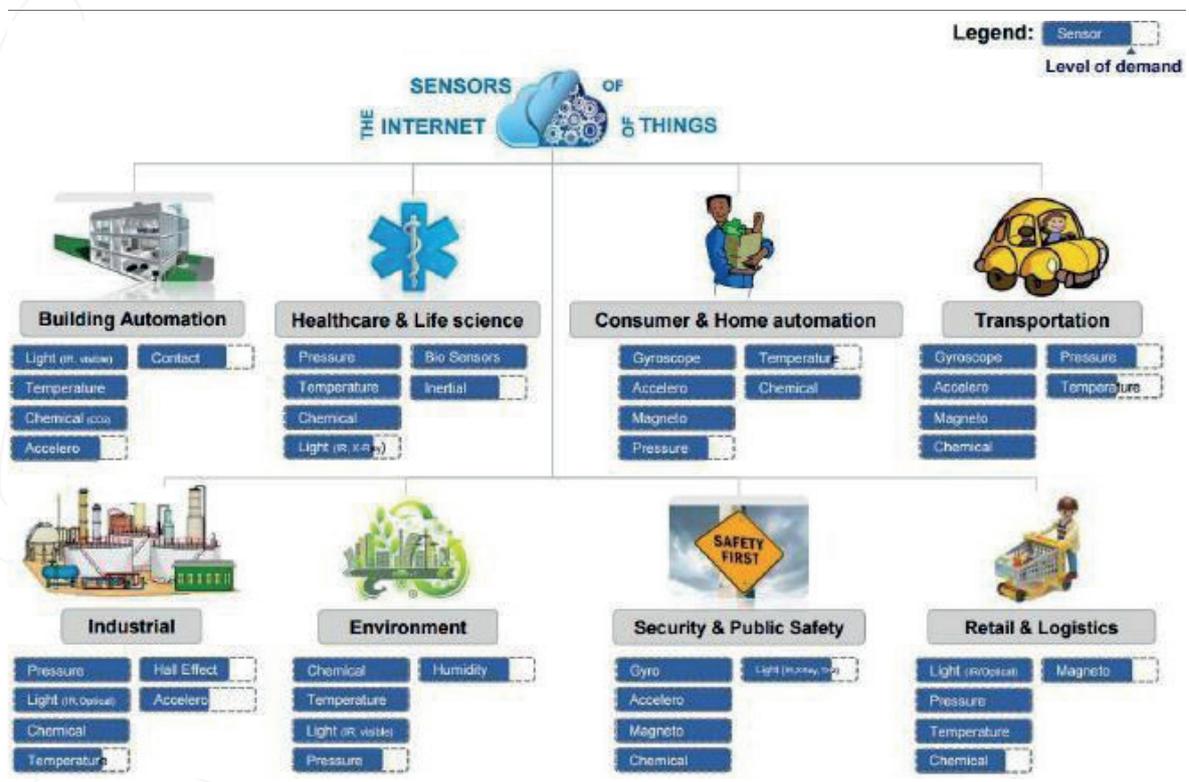
- i. “Coisas” com habilidade de armazenar (sensoriar) e armazenar dados (sem capacidade de processar/analisar).
- ii. “Coisas” com capacidade adicional de computação embarcada: dados produzidos pelos sensores são analisados em tempo real por meio de inteligência artificial distribuída.

Além de seu uso em produtos finais inovadores – e com potencial de abrirem novos (segmentos de) mercados – a aplicação industrial da IoT pode se dar em diferentes áreas, tais como:

- Manutenção preditiva e preventiva.
- Otimização de estoques.
- Segurança do trabalho e gestão da saúde ocupacional.
- Ajuste da produção à demanda (otimização de vendas).
- Detecção precoce de problemas com a fabricação dos produtos.
- Otimização da logística de armazenamento e distribuição.
- Veículos industriais autônomos.
- Gestão ambiental.
- Gestão de energia.
- Gestão de sistemas urbanos (por exemplo, tráfego, iluminação pública).
- Segurança patrimonial e dos ativos.
- Desenvolvimento de produtos.
- Otimização dos processos produtivos.
- Aumento da produtividade do trabalho.

A Figura 12 ilustra os tipos de sensores de IoT por setores industriais.

Figura 12 – Tipos de sensores por setores industriais



Fonte: Yole Development

Adicionalmente, prevê-se que o processamento de dados não ficará mais concentrado em uma única instalação centralizada, geralmente denominada de Nuvem. Há a possibilidade de o processamento de dados ser distribuído de forma a ficar mais próximo das bordas e dos dispositivos. Isto serve para que sejam mitigados problemas oriundos dos gargalos de conectividade de rede e da latência excessiva inerente à transmissão de dados a locais mais distantes. O novo pensamento para a Internet das Coisas precisará ser: “Qual é o melhor lugar para processar os dados com o menor custo, gerando as melhores informações para a produção ou para gestão da rede ou da organização?”. Muitos dos dados coletados precisam ser analisados localmente para gerar ações rápidas em segundos. Não é possível esperar por uma conexão de rede para acessar a nuvem, para que ela diga o que fazer.

Para acompanhar essa necessidade de aproximação da borda, vem sendo desenvolvido o conceito de *Edge* ou *Fog Computing*, que utiliza *Gateways*, definindo uma arquitetura que estende a capacidade computacional e o armazenamento da Nuvem para as camadas de sensores e atuadores da rede. Esta arquitetura permite que os dados gerados pelos sensores sejam analisados e transformados em informações ou em ações para os atuadores, antes de serem transmitidos para a nuvem. *Edge* ou *Fog Computing* ajuda a reduzir os custos das aplicações de IoT. Isto permite também resolver e otimizar questões como desempenho e confiabilidade do sistema e resolver e atenuar muito os problemas de segurança.

Essa arquitetura *Edge (Fog) Computing* gera vários benefícios: (1) não é necessário que cada ação da análise de dados passe do dispositivo para a nuvem e vice-versa, mantendo ações críticas dentro do domínio do *gateway*; (2) os dispositivos podem executar suas tarefas em domínios onde a largura de banda é pequena, ou a conexão com a internet nem sempre está disponível; (3) com o uso de técnicas de segurança localizadas, pode-se impedir ataques à integridade dos dados, das máquinas e das pessoas; e (4) diminui custo de investimento, melhora o desempenho operacional e permite ações em tempo real.

Cabe destacar ainda os chamados *middleware* de IoT, que correspondem a uma camada de *software* que conecta e integra os componentes da solução, isto é, os dispositivos, os serviços de suporte e as aplicações. Os *middleware* se aplicam à maioria dos casos de uso de Internet das Coisas porque se trata de uma camada de *software* que suporta um conjunto básico e essencial de funcionalidades:

- i. **Mediação com os dispositivos:** conecta e integra ao *middleware* os diferentes dispositivos IoT, permitindo a coleta de dados, o gerenciamento e a atuação, independentemente do protocolo ou modelo de comunicação adotado pelo dispositivo.
- ii. **Virtualização e gerenciamento de dispositivos:** abstrai os dispositivos físicos, virtualizando estes dispositivos no *middleware* e possibilitando gerenciar seu ciclo de vida, permitindo que se foque apenas no modelo de dados, o que facilita, por exemplo, a criação de “*twins* digitais” e o desenvolvimento de aplicações.

- iii. **Processamento e armazenamento de dados e eventos:** processa os dados/eventos coletados dos dispositivos e também provenientes de serviços de suporte a aplicações, e armazena-os de maneira adequada para acesso e processamento posterior.
- iv. **Mediação com os serviços de suporte a aplicações:** conecta e integra ao *middleware* aos serviços de suporte a aplicações de IoT, aumentando o seu escopo funcional, permitindo as aplicações de acessar os serviços e recursos do *middleware*.

A integração desses *middlewares* em plataformas comerciais e de código aberto têm como objetivo simplificar a conexão dos dispositivos com uma infraestrutura de *software* que habilita um rápido desenvolvimento e implantação de aplicações.

4.4 Produção Inteligente e Conectada⁸

O *cluster* Produção Inteligente e Conectada se encaixa nas Categorias Analíticas da seguinte forma:

- i. **Tipos de Inovação:** Principalmente inovações de processo, organizacional e mercados. Para os usuários das inovações, a PIC envolve, essencialmente, inovações de processo. Isto implica, simultaneamente, inovações na cadeia de fornecedores. Estes sistemas habilitam ou facilitam inovações de produto e a abertura de novos mercados, principalmente através da “servitização”. Naturalmente estes sistemas implicam e demandam mudanças organizacionais. Quanto mais amplo o sistema PIC, mais profundas e significativas as mudanças organizacionais. Para os produtores de componentes, produtos, serviços ou sistemas associados à PIC, as inovações são tipicamente de produto, com impactos ao longo de suas cadeias produtivas (desde fornecedores a clientes), em seus processos produtivos assim como na organização da empresa. Quanto maior a dedicação de uma empresa para com sistemas PIC, maior a necessidade de novas competências, maior o potencial de mudanças que podem ocorrer via investimentos orgânicos ou acelerados pela aquisição de outras empresas.
- ii. **Espectro de aplicação:** Tecnologias de propósito específico a processos produtivos em qualquer atividade industrial. As soluções de PIC são específicas a cada tipo de sistema produtivo e suas necessidades (por exemplo, gargalos).
- iii. **Contribuição do Cluster para os demais:** MA, Nano, BIO. As principais contribuições do *cluster* PIC dizem respeito à sua utilização nos *clusters* tecnológicos materiais MA, Nano e BIO, que se valem de manufatura aditiva (MA e Nano) e de sistemas ciberfísicos para modelagem de moléculas.
- iv. **Prospectiva tecnológica:** Convivência de tecnologias em seleção e em mutação. Em termos de tecnologias do núcleo duro, há baixa incerteza com a possível exceção de manufatura aditiva (*3D printing*). No entanto, há *alta incerteza arquitetural*,

8. Baseado no relatório preliminar de Naveiro (2017).

por conta de: (1) O avanço de IA pode trazer surpresas, a digitalização pode se tornar mais poderosa ou disruptiva, se as máquinas ganharem capacidades cognitivas avançadas (aprender, processar, compreender, gerar hipóteses e tomar decisões). Podem haver mudanças qualitativas no próprio processo da PIC como um todo; (2) incertezas sobre a própria capacidade dos elos da cadeia em se adaptarem (adaptação do regime tecnológico), além de problemas com o legado de gerações antigas. Ou seja, a trajetória da PIC não é ainda previsível; e (3) uma guerra de padrões (proprietários vs. abertos; ou “americano” vs. “alemão”) é uma possibilidade não resolvida, e mesmo as tecnologias de núcleo duro não têm padronização de interoperabilidade.

v. Natureza da inovação: Incremental com potencial radical.

Atualmente e por conta da flexibilidade de sistemas inteligentes em áreas específicas de uma empresa, a introdução e os impactos da Produção Inteligente e Conectada tendem a ocorrer aparentemente de forma incremental, com focos em etapas específicas da cadeia de produção. Não se tem conhecimento de “arranjos empresariais” (no sentido de empresas interligadas com fornecedores e clientes) que utilizem atualmente sistemas de produção inteligente e conectada no limite da técnica. São muito poucos os casos de uma instalação fabril que as utilize em plenitude. Há, no entanto, experimentos pilotos que vêm se multiplicando (*first movers* e *fast followers*) e que demonstram a viabilidade de arranjos organizacionais radicalmente inovadores. Assim, é provável que os sistemas de Produção Inteligente e Conectada resultem, no tempo e com sua ampla difusão, em inovações radicais de natureza organizacional. Embora possa se fazer por partes ou blocos, trata-se de um avanço incremental de natureza distinta. As mudanças de cada etapa são, embora restritas, radicais em seus impactos. São saltos qualitativamente diferentes, ainda que fragmentados. Tratam-se de inovações modulares que caminham em direção a uma arquitetura radicalmente inovadora. Aqui, mudança é qualitativa e não apenas quantitativa. Com o tempo, e com o aprendizado, é possível percorrer uma trajetória de aperfeiçoamento “incremental”. Quando se passa de uma massa crítica, de um *tipping point*, esse movimento incremental transborda e se torna radical. A vantagem competitiva adquirida é então muito forte, fazendo estrago na estrutura de mercado. Aparentemente incremental, mas logo radical.

4.4.1 Caracterização

A Produção Inteligente e Conectada (PIC) refere-se a **sistemas ciberfísicos de interconexão, digitalização, processamento e otimização da cadeia produtiva (incluindo seus processos e desenvolvimento de produtos, quase que personalizados)**, com crescente utilização de inteligência artificial. Trata-se de uma inovação arquitetural em três níveis: (1) tecnologias do núcleo duro e as associadas; (2) blocos da cadeia produtiva onde essas tecnologias são aplicadas, incluindo a produção em si (dentro da fábrica); e (3) arquitetura da produção inteligente e conectada que integra todos os elos da cadeia produtiva. Os avanços arquiteturais tornam-se, assim, cada vez mais complexos, incertos e mais disruptivos, pois a forma integrada de organização das tecnologias e blocos é crucial.

A PIC é baseada em infraestruturas de comunicação em sistemas de produção, aliadas à inteligência artificial, permitindo aplicações em processos, serviços, diagnóstico e operação de produtos. As máquinas são conectadas e acessíveis enquanto objetos na rede, podendo dispor de dados em tempo real. Esses dados são passíveis de exploração, análise e intervenção através da própria rede. Ademais, as máquinas poderão guardar documentos e informações sobre si mesmas fora do seu corpo físico, implicando uma representação virtual com identificadores próprios, bem como serem habilitadas para processos cognitivos (*machine learning*).

A produção inteligente e conectada permitirá, assim, um novo patamar de interação do mundo físico e virtual. Além disso, a PIC também propicia o surgimento de novos modelos de negócios, a otimização do ciclo de vida dos produtos, sistemas de manufatura reconfiguráveis e a integração vertical de atuadores e sensores até os sistemas de planejamento de recursos (ERP).

São dois os modelos de referência de PIC: o norte-americano e o alemão, conhecidos como Manufatura Avançada e Indústria 4.0, respectivamente (Quadro 5). Para vários autores, a PIC pode ser considerada como uma verdadeira “quarta revolução industrial”.

Quadro 5 – Os Modelos Norte-americano e Alemão para Produção Inteligente e Conectada

Modelo norte-americano: <i>Advanced Manufacturing</i>	Modelo alemão: <i>Industrie 4.0</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de várias tecnologias habilitadoras – TIC, materiais, energia, de produção – que evoluem constantemente, mas que, com estímulos adequados, saltam para outro patamar evolutivo. • O Programa Nacional de Manufatura Avançada, vinculado ao Gabinete da Presidência dos Estados Unidos, recebeu um orçamento inicial de USD 1 bilhão para a criação de uma Rede Nacional para Inovação na Manufatura. Participam desta rede 85 empresas, 13 universidades, nove escolas superiores, e 18 organizações profissionais e organizações sem fins lucrativos. O Programa criado pelos Estados Unidos envolve um número expressivo de parceiros e institutos de pesquisa sendo mais abrangente que o programa alemão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo baseado no processo de digitalização crescente da fabricação. • O conceito de Indústria 4.0 é parte da estratégia de tecnologia do governo alemão e propõe-se a reorganizar a cadeia produtiva, conectando máquinas e pessoas nas chamadas <i>smartfactories</i>. • O modelo proposto pela Alemanha reflete a importância do seu setor de manufatura que representa um quinto do PIB do país e está calcado no reforço da sua eficiência produtiva, assim como permite que a indústria de máquinas e equipamentos alemã aumente suas exportações e aumente a difusão dessas tecnologias em outros países.

Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

As tecnologias para a produção inteligente e conectada podem ser divididas entre as “tecnologias de fronteira” (habilitadoras) e as de alta funcionalidade.

- i. As primeiras incluem (a) nanotecnologias e tecnologias que se valem do conhecimento da matéria e (b) tecnologias baseadas em física quântica, cujo

desenvolvimento poderá garantir avanços na produção de *chips* e no sistema lógico, respectivamente, renovando, assim, a chamada Lei de Moore.

- ii. As tecnologias de alta funcionalidade incluem desde sistemas altamente configuráveis e gerais até aqueles altamente focados, profundos e de altíssima *performance*. São exemplos a internet móvel, *big data*, internet das coisas, robótica, manufatura aditiva e computação em nuvem.

Uma outra forma de organizá-las é com a divisão em tecnologias próprias (núcleo duro) e tecnologias associadas:

- i. O chamado núcleo duro é composto por robótica autônoma e colaborativa, manufatura aditiva, novos materiais e virtualização da produção (sistemas ciberfísicos).
- ii. As tecnologias de redes de comunicação, *big data*, internet das coisas (IoT) e também *blockchain* são consideradas tecnologias associadas e viabilizadoras da Produção Inteligente e Conectada. Essas tecnologias complementam e interceptam as tecnologias-chave do núcleo duro, especialmente a virtualização da produção.

4.4.2 Evolução recente e prospectiva

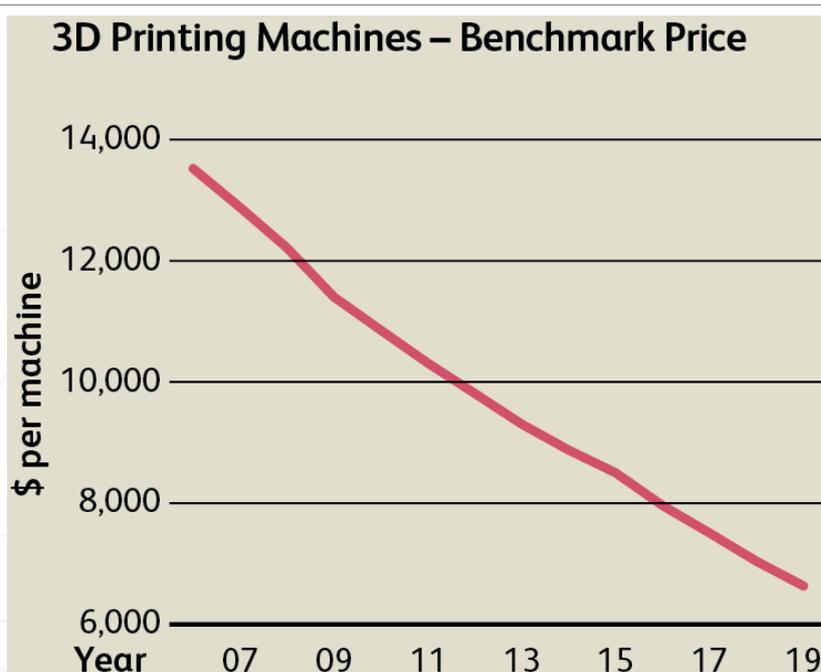
Dentre as principais tecnologias do núcleo duro em uso e em desenvolvimento para uso em 5-10 anos, destacam-se:

- i. **Manufatura aditiva:** processo de manufatura realizado pela junção de partículas, camada por camada, a partir de um modelo 3D do objeto. Esse processo é aplicado sobretudo para peças de geometria complexa, de alto valor agregado, produzidas em lotes pequenos. Demanda materiais sob a forma de pós/granulados, líquidos e filamentos. As principais aplicações da manufatura aditiva estão relacionadas à indústria de manufatura, especialmente para os setores de produção de máquinas, aeroespacial, automotivo e de bens de consumo.
- ii. **Robótica autônoma e colaborativa:** robôs são dispositivos capazes de captar as condições do campo de trabalho e executar a tarefa de forma autônoma através dos seus sensores, processadores e atuadores. Eles também permitem compartilhar funções entre robôs e pessoas na execução de uma ou mais tarefas. Robôs podem ser classificados em cinco tipos:
 - Robôs móveis, aplicados para uso militar, industrial, comercial ou doméstico, guiados por marcas no solo, visão ou *laser*.
 - Robôs industriais, compostos de braço e ferramenta terminal (ex.: garra), muito utilizados para soldagem e montagem.
 - Robôs de serviço, empregados para atividades de limpeza, manutenção e inspeção.
 - Robôs colaborativos (*cobot*), aptos a interagir e dividir tarefas com seres humanos.
 - Robôs autônomos: grande aplicação para os robôs de serviço.

iii. **Virtualização da produção – Sistemas ciberfísicos:** Os sistemas ciberfísicos são configurações de sistemas embarcados, sensores e atuadores conectados a redes, que viabilizam a virtualização da produção. Esses sistemas são constituídos por subsistemas autônomos e colaborativos capazes de estabelecer conexões entre si, através de todos os níveis da cadeia produtiva, dependendo dos requisitos de cada situação. A comunicação entre os componentes permite realizar, remotamente, controle de processos, serviços de diagnóstico e operação de produtos. Os sistemas ciberfísicos permitem, portanto, a interação entre entidades físicas e computacionais. Esses sistemas precisam compatibilizar duas abordagens distintas: eventos discretos (sistemas computacionais) e processos contínuos dos sistemas físicos.

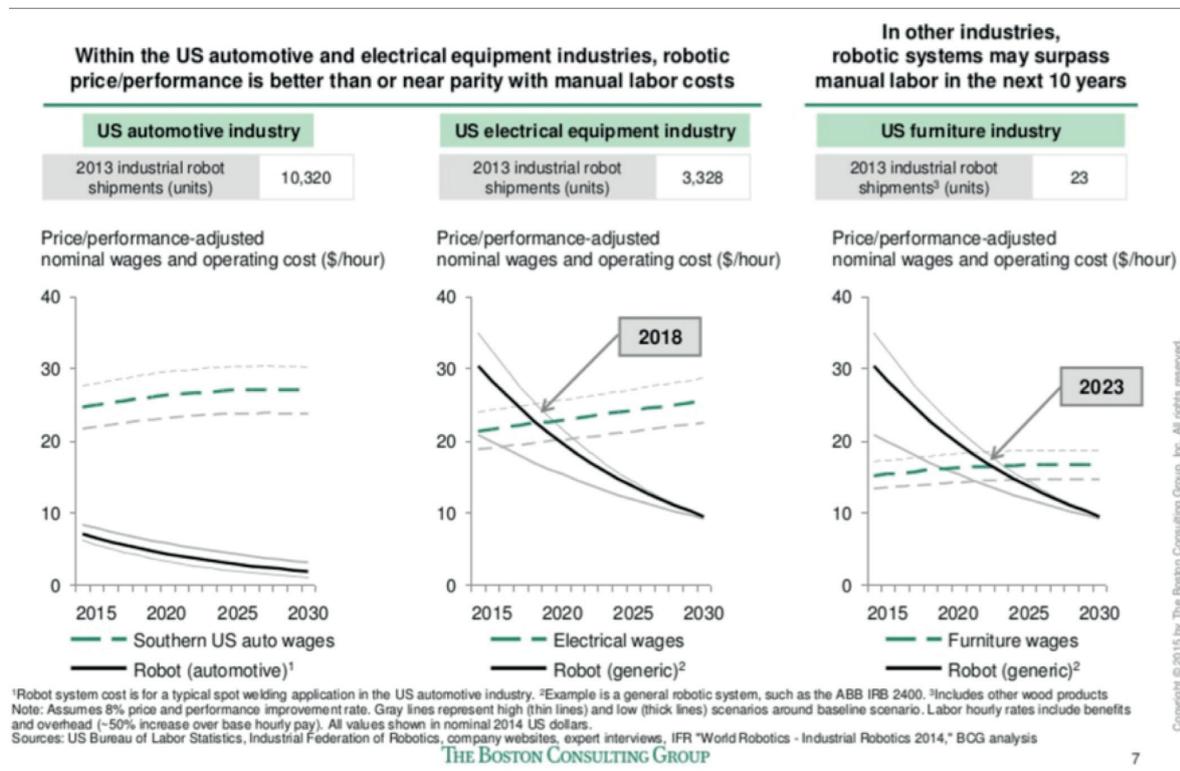
Para indicar a evolução recente e prospectiva em termos de custo e difusão, apresentamos indicadores para algumas tecnologias selecionadas. A Figura 13 indica o custo de máquinas para manufatura aditiva, enquanto a Figura 14 mostra o custo operacional de robôs em relação ao custo do trabalho em setores selecionados nos EUA. Já, o crescimento do mercado para manufatura aditiva industrial (em termos de receitas) está estimado em 25% ao ano entre 2014 e 2020, chegando neste ano a receitas estimadas de USD 17,2 bilhões. Estima-se que o mercado de robótica também crescerá significativamente na próxima década, saltando de USD 26,9 bilhões em 2015 para USD 42,9 bilhões em 2020 e USD 66,9 bilhões em 2025 – o segmento industrial continuará respondendo pela maior parte da demanda por robôs, mas para 2025 estima-se que o segmento comercial estará equiparado em importância ao segmento militar.

Figura 13 – Custo de Máquinas para Manufatura Aditiva



Fonte: IBISWorld

Figura 14 – Custo operacional de robôs em relação ao custo do trabalho. Indústrias selecionadas (EUA)



Fonte: Boston Consulting Group

4.4.3 Potencial de uso genérico das inovações

Em qualquer atividade produtiva podem ser introduzidas tecnologias instrumentais ou sistemas de Produção Inteligente e Conectada, sendo estes aplicados em várias áreas ou somente em áreas específicas de uma empresa. As implicações mais relevantes desses usos são:

- Maior diversidade de modelos de fábricas, com soluções de sistemas PIC adequados às características de mercados específicos.
- Sistemas de fabricação de maior *performance* e mais flexíveis, entregando melhor qualidade e *performance* de custos.
- Cadeias de manufatura digitalizadas, com conexões digitais entre clientes, fabricantes e fornecedores, aumentando a velocidade e a eficiência da fabricação, e melhorando oportunidades de colaboração entre empresas, indistintamente de sua localização geográfica.
- Maior grau de liberdade de projeto e desenho.
- Melhor customização de produtos e serviços (chamada de "clientização").
- Personalização de produtos de baixo custo, sob demanda.
- Entrega de produtos novos e inovadores.

- Viabiliza a reindustrialização de países cujas cadeias produtivas foram deslocadas (*offshoring*) atrás dos custos mais baixos de matéria prima e salários de países em desenvolvimento.
- Eventualmente, bases produtivas mais distribuídas geograficamente (não necessariamente, a depender de *frameconditions* e cálculos econômicos complexos), atendem a demandas locais com a manufatura feita próxima ao consumidor.

Os sistemas de Produção Inteligente e Conectada provocam mudanças na geração de valor na cadeia produtiva da manufatura. Dessa forma, a geração de valor na cadeia produtiva não se dá apenas na etapa de fabricação, mas sobretudo nas etapas a montante e a jusante da produção. As atividades a montante incluem atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D), cadeia de suprimentos e planejamento de processos. Já as atividades a jusante incluem a distribuição, manutenção, monitoramento do ciclo de vida do produto.

4.5 Materiais Avançados⁹

O *cluster* Materiais Avançados se encaixa nas Categorias Analíticas da seguinte forma:

- i. Tipos de Inovação:** Inovações de produto, insumos e mercados.
As inovações de MA são de fato novos insumos que permitem o desenvolvimento de novos produtos (itens de vestuário com propriedades de alto desempenho; drogas com liberação controlada), mudanças em processos (materiais para impressão 3D) e abertura de novos mercados (produtos de biorrefinaria).
- ii. Espectro de aplicação:** Tecnologias de propósito específico.
Trata-se de um *cluster* com grande variedade de tecnologias cujas aplicações são específicas a cada sistema produtivo.
- iii. Contribuição do Cluster para os demais:** Redes, Nano, AE.
Os materiais avançados contribuem para as inovações do *cluster* Redes (polímeros condutores e bioativos para eletrônica impressa), Nano (nanomateriais); e AE (terras raras).
- iv. Prospectiva tecnológica:** Convivência de tecnologias maduras, em seleção e em mutação.
As tecnologias dos nanomateriais, seus produtos e processos são as mais maduras no *cluster*. Em se tratando de Materiais Autorreparáveis e/ou Funcionais; Materiais de Elevado Desempenho; Materiais de Fontes Renováveis e Produtos da Biorrefinaria; e Terras Raras (ímã permanente de terras raras, bem como suas aplicações em baterias de veículos elétricos e híbridos), há tanto tecnologias em seleção, quanto em mutação.

9. Baseado no relatório de Carvalho (2017).

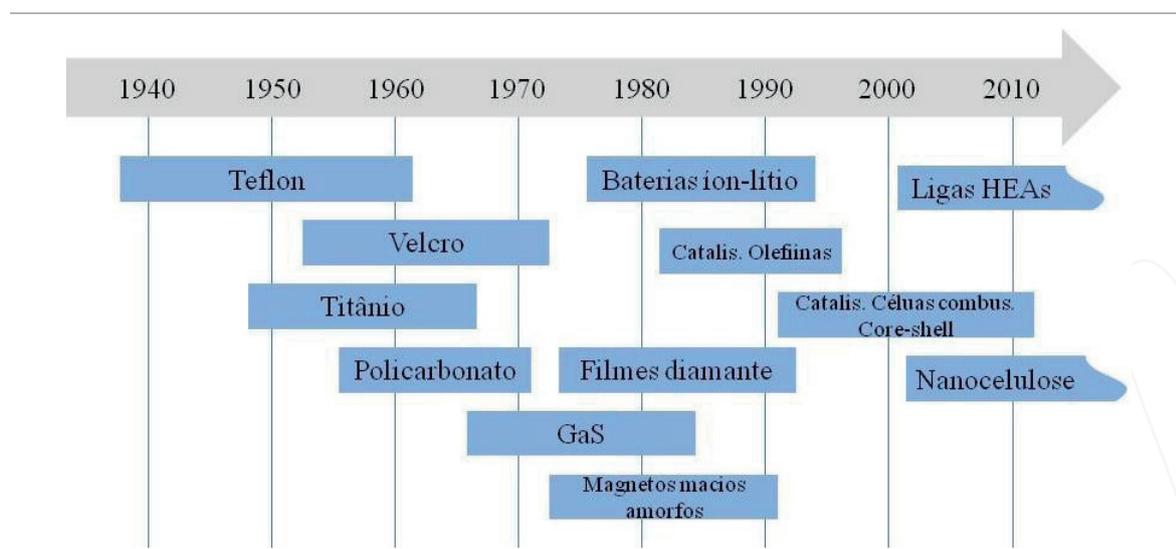
v. **Natureza da inovação:** Predomina incremental.

As inovações do *cluster* são, em sua maioria, de natureza incremental. Isto é, novos materiais são agregados a produtos, sem mudar o objetivo específico a que ele é destinado, mas mudando algumas de suas relações técnicas como a relação peso/tamanho de um equipamento.

4.5.1 Caracterização

Materiais Avançados representam avanços sobre materiais tradicionais, englobando materiais novos ou modificados com desempenho (estrutura ou funcionalidade) superior em uma ou mais características críticas para sua aplicação comercial. Os Materiais Avançados – também chamados de *value-added materials* – permitem a introdução nos mercados de novos produtos (inovadores ou superiores aos existentes). O período estimado de maturação dos Materiais Avançados é longo (cerca de 20 anos – Figura 15) e seus avanços dependem de fatores científicos e tecnológicos, assim como aqueles relacionados a custos, logística, regulamentações e de mercado.

Figura 15 – Período de tempo decorrido entre invenção e introdução no mercado



Fonte: Carvalho (2017)

Para fins analíticos, os Materiais Avançados podem ser divididos em cinco grupos:

Grupo 1: Nanomateriais, seus produtos e processos

- Materiais 2D – Grafeno e outros tais como MoS_2 , WS_2 , argilas (montmorilonita).
- Nanotubos de carbono já em uso e com aplicação desde a fabricação de circuitos eletrônicos até compósitos de elevado desempenho com matriz cerâmica, metálica ou polimérica (novos equipamentos e sistemas).
- Nanocompósitos poliméricos e processo para sua preparação.

Grupo 2: Materiais Autorreparáveis e/ou Funcionais

- Compósitos carbono-vidro autorreparáveis – materiais com a capacidade de estancar a propagação de trincas (indústria de compósitos estruturais).
- Polímeros termorreversíveis.
- Materiais para liberação controlada (fármacos, repelentes, fragrâncias, defensivos e nutrientes), inclusive polímeros e biovidro.
- Sensores térmicos com bloqueio, sensores de radiação e de contaminação.
- Materiais para eletrônica impressa (polímeros condutores, bioativos).
- Têxteis (bioinspirados, novos filamentos), aplicáveis tanto em vestuário quanto em outros setores, como medicina e compósitos de elevado desempenho (fibra de carbono).
- Biovidros (vidros funcionais para aplicação médica e dentária), biovitrocerâmicas para regeneração de tecidos e materiais leves para segurança em vitrocerâmicas de elevada resistência.

Grupo 3: Materiais de Elevado Desempenho

- Metais vítreos.
- Ligas leves de elevada resistência mecânica e térmica.
- Cerâmicas isolantes térmicas monolíticas (aerogéis).
- Materiais leves para proteção balística.
- Materiais para impressão 3D (metais, polímeros, cerâmicas e compósitos).
- Materiais avançados estruturais (compósitos, expandidos rígidos).
- Materiais para cobertura de edifícios (fotovoltaicos, poliméricos, fibrocimento).
- Vidros de elevada resistência (defesa, blindagem leve, materiais de segurança, automobilística).

Grupo 4: Materiais de Fontes Renováveis e Produtos da Biorrefinaria (sistema produtivo que produz combustíveis, energia, insumos químicos e materiais a partir da biomassa)

- Blendas poliméricas com biopolímeros.
- Nanocelulose, que deve gerar inovações em vários setores como fibras têxteis, fibras de carbono derivadas de fontes renováveis e biomateriais.
- Produtos da biorrefinaria (furanos, glicerol, óleo-química, lignina, pectina, óleo fúsel, sílica, ceras etc.).
- Fibra de carbono verde (produzida a partir da lignina, celulose etc.).
- Biopolímeros (regeneração de tecidos, biodegradáveis, *skaffolds* etc.).

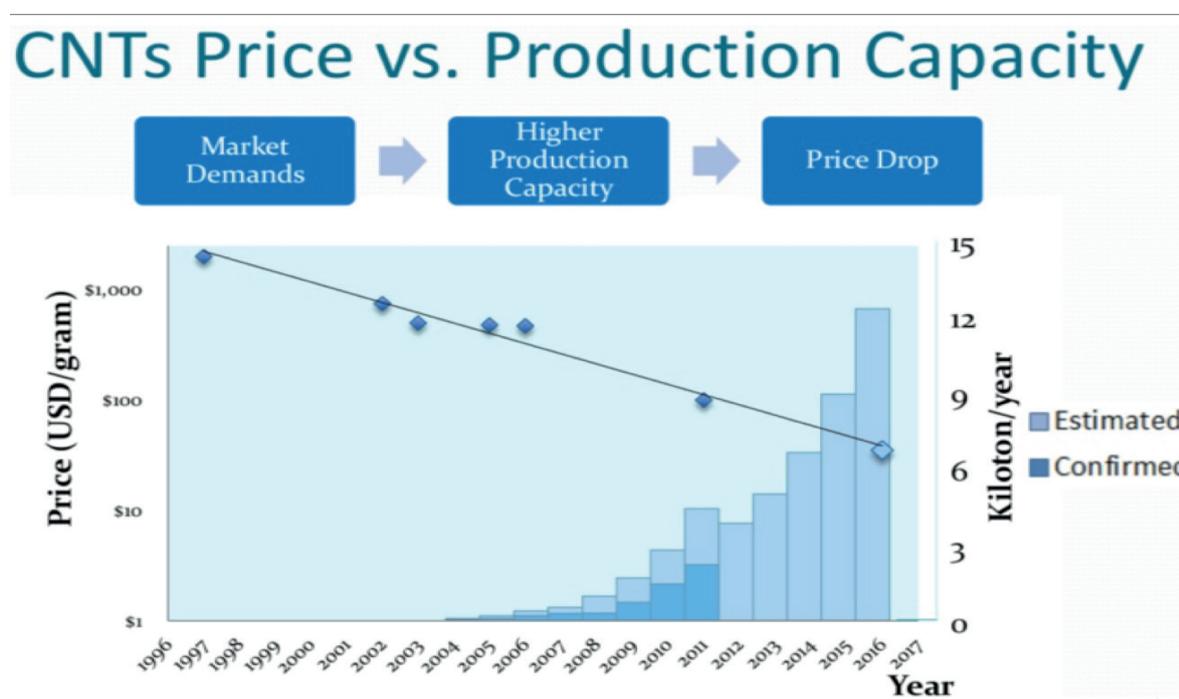
Grupo 5: Terras Raras – imã permanente de terras raras e suas aplicações em baterias, veículos elétricos e híbridos

- Preparação de compostos e ligas de terras raras para aplicação em imã permanente de elevado produto energético.

4.5.2 Evolução recente e prospectiva

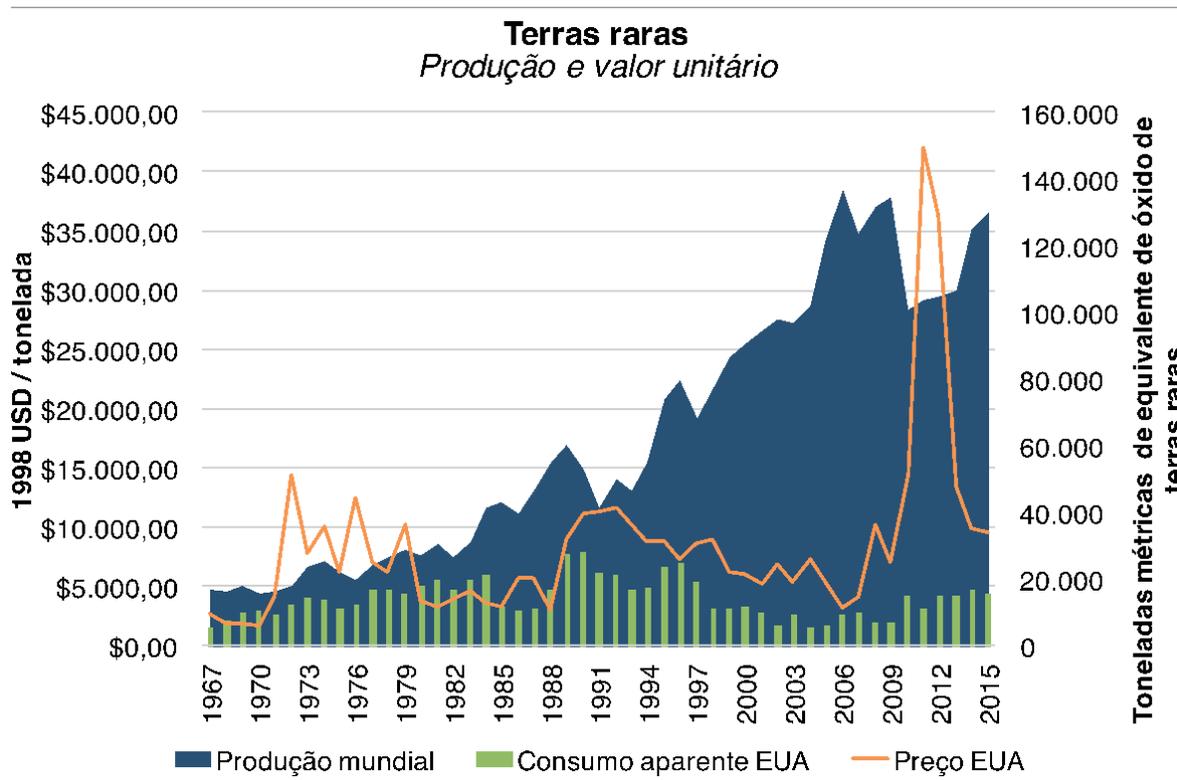
Em termos de custos, materiais avançados apresentam tendências distintas a depender do grupo considerado. Por exemplo, materiais do grupo 1, como nanotubos de carbono, apresentam custos cadentes, impulsionados por um crescimento da capacidade produtiva instalada (Figura 16). Isto contribuirá para uma projeção de demanda acentuada por estes materiais até meados da década de 2020, variando de 2,5 toneladas/ano num cenário conservador a cerca de 20 toneladas/ano no cenário mais otimista. Por outro lado, o preço das terras raras (grupo 5) apresenta uma dinâmica volátil como as demais *commodities* minerais, a depender de condições de oferta e de demanda (Figura 17).

Figura 16 – Evolução do custo de nanotubos de carbono e capacidade instalada



Fonte: <https://pt.slideshare.net/Funk98/mt5009-group-revolvecarbonnanotubefinal/22>

Figura 17 – Demanda por nanotubos de carbono



Fonte: US Geological Survey

A heterogeneidade das tecnologias do *cluster* Materiais Avançados faz com que o tempo de maturação das inovações associadas a cada grupo varie, conforme indicado no Quadro 6.

4.5.3 Potencial de uso genérico das inovações

Quanto a seus usos, Materiais Avançados apresentam usos específicos a depender dos materiais e aplicações. Por exemplo:

- Embalagens e estruturas funcionais e “inteligentes” (por exemplo, autorreparáveis, com ação fungicida/bactericida, de autocrescimento, com sensibilidade térmica etc.).
- Estruturas resistentes (mecânica e térmica) e/ou leves (materiais de alto desempenho).
- Materiais para liberação controlada de compostos (no organismo humano e animal, ou no meio ambiente).
- Materiais para impressão de circuitos eletrônicos e impressão aditiva (3D).
- Materiais bionspirados, biomiméticos e biodegradáveis (isto é, materiais com propriedades semelhantes a materiais naturais e/ou de fontes renováveis/substitutos de materiais de origem fóssil).
- Ímãs permanentes (com aplicação em motores veiculares e industriais).

Quadro 6 – Evolução prospectiva: horizonte de maturação dos materiais avançados

Grupo	Materiais Avançados/Processos para sua obtenção	Tempo de Maturação
Grupo 1: Nanomateriais e seus produtos	Grafeno e seus sistemas	> 10
	Nanotubos de carbono	5
	Novos processos para prod. nanocompósitos	5-10
Grupo 2: Materiais Autorreparáveis e Materiais Funcionais	Polímeros termorreversíveis	10
	Materiais para liberação controlada (fármacos, repelentes, fragrâncias, defensivos e nutrientes), incluindo polímeros e biovidro	5
	Sensores térmicos com bloqueio, sensores de radiação e de contaminação	5
	Materiais para impressão via jato de tinta (polímeros condutores, bioativos)	5-10
	Têxteis (bioinspirados, novos filamentos), tanto para vestuário quanto para outros setores, como medicina e compósitos de elevado desempenho (fibra de carbono)	5
	Biovidro – vidros com atividade biológica	5
Grupo 3: Materiais de Elevado Desempenho	Metais vítreos	10
	Ligas leves de elevada resistência mecânica e térmica	5-10
	Cerâmicas isolantes térmicas monolíticas (aerogéis)	5
	Materiais leves para proteção balística	5
	Materiais para impressão 3D (metais, polímeros, cerâmicas e compósitos)	10
	Materiais avançados estruturais (compósitos, expandidos rígidos)	10
	Vidros de elevada resistência (laminados inclusive)	10
Grupo 4: Materiais de Fontes Renováveis e Produtos da Biorrefinaria	Blendas poliméricas com biopolímeros	5
	Nanocelulose	5
	Produtos da biorrefinaria (furanos, glicerol, óleo-química, lignina, pectina, óleo fúsel, etc.)	10
	Fibra de Carbono – Verde	10
	Biopolímeros (regeneração de tecidos, biodegradáveis, <i>skaffolds</i> , etc.)	5-10
Grupo 5: Terras Raras	Compostos e ligas de terras raras para ímãs permanentes de elevado desempenho	5-10

Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

4.6 Nanotecnologia¹⁰

O *cluster* Nanotecnologia se encaixa nas Categorias Analíticas da seguinte forma:

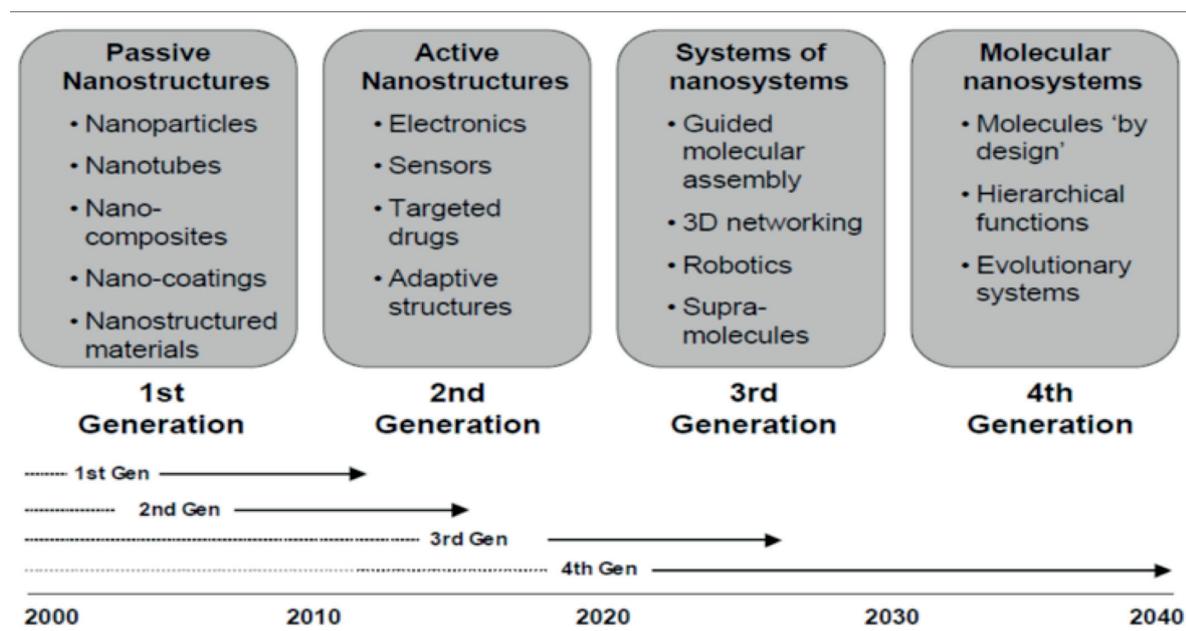
- i. Tipos de Inovação:** Inovações de produto, insumos, processos e mercados.
As nanotecnologias são insumos, partes e componentes utilizados em produtos de várias indústrias, o que instrumentaliza, inclusive, o desenvolvimento de novos produtos, implicando o surgimento de novos mercados. Como consequência, as nanotecnologias impactam e modificam processos e formas de organização de empresas, demandando novas competências.
- ii. Espectro de aplicação:** Tecnologias de propósito geral.
As nanotecnologias possuem múltiplas aplicações em todos os sistemas produtivos, como por exemplo em nanomedicina (diagnóstico, terapia e "teranósticos") e nanocosméticos; nanoeletrônica e novos materiais para computação; vestuário e dispositivos flexíveis e vestíveis; sensoriamento para Internet das Coisas; energia como tecnologia auxiliar; e alimentos como tecnologia habilitadora para garantir segurança alimentar e "nanocomidas" (nanofood).
- iii. Contribuição do *Cluster* para os demais:** IoT, Redes, PIC, MA, BIO, AE.
As nanotecnologias contribuem para todos os demais *clusters* com exceção de IA (que, por sua vez, é instrumental para nano). No caso de IoT, Redes e PIC, as principais contribuições são por conta da nanoeletrônica. Nanotecnologias formam um subgrupo do *cluster* MA. No *cluster* BIO, nanotecnologias entram através da nanomedicina. E em AE, as nanotecnologias contribuem com suas aplicações no campo da energia.
- iv. Prospectiva tecnológica:** Convivência de tecnologias em seleção e em mutação.
Existem algumas tecnologias maduras (como em medicina/cosméticos; nanoeletrônica; vestuário; IoT; e energia), mas há incertezas quanto a padrões técnicos, por exemplo, o que faz com que predominem tecnologias em seleção e em mutação.
- v. Natureza da inovação:** Predomina radical
As nanotecnologias tendem a criar novos mercados, substituindo produtos ou permitindo a transformação de processos, quando devidamente introduzidas na forma de produtos ou componentes e insumos. Como será descrito em seguida, nanotecnologias ativas e, principalmente, sistemas de nanossistemas, como redes 3D em robótica e montagem molecular guiada, implicam mudanças radicais em processos, produtos e formas de organização de uma empresa.

10. Baseado no relatório de Oliveira Jr. (2017).

4.6.1 Caracterização

Nanociência e nanotecnologia podem ser definidas como áreas da ciência e da tecnologia que lidam com a matéria na escala nanoscópica (menor do que aproximadamente 100 nm em pelo menos uma de suas dimensões), e aplicam os conceitos e materiais produzidos a partir de tais estudos. As nanotecnologias podem ser classificadas em diferentes gerações tecnológicas, conforme a Figura 18.

Figura 18 – Gerações de Nanotecnologias



Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

Atualmente, as nanotecnologias se encontram na transição da segunda geração, das “nanoestruturas ativas” utilizadas em eletrônica, sensores, medicamentos, objetos e estruturas adaptativas, para a terceira geração, dos “sistemas de nanossistemas”, como redes 3D em robótica, estruturas supramoleculares e montagem molecular guiada. Dentre as principais áreas de aplicação de nanotecnologias na próxima década, destacam-se:

- i. **Nanomedicina (diagnóstico, terapia e “teranósticos”) e Nanocosméticos:** vacinas, medicamentos antibacterianos, ferramentas de diagnóstico e imagem (nanossensores, tatuagens eletrônicas), dispositivos portáteis e plataformas de rastreamento de alto rendimento; nanomateriais para implantes e órgãos artificiais; liberação controlada e direcionada de medicamentos; *nanobots* que diagnosticam anomalias celulares e liberam medicamentos; nanopartículas para melhorar cor, transparência, solubilidade e eficiência de cosméticos.

- ii. **Nanoeletrônica e novos materiais para computação:** aplicação de nanotecnologia a dispositivos eletrônicos, optoeletrônicos, spintrônicos, eletrônica molecular e para computação quântica, assim como as técnicas de nanofabricação dessas estruturas e sua integração em microsistemas. A nanoeletrônica abrange também dispositivos em nanoescala que agem como sensores e atuadores em nanofluidos e motores moleculares. Além disso, dispositivos para auxiliar pessoas com algum tipo de deficiência motora e novas formas de computação inspiradas no funcionamento do cérebro (redes neurais artificiais).
- iii. **Vestuário e dispositivos flexíveis e vestíveis:** roupas com funcionalidade “tradicional” (não precisam ser passadas; repelente de manchas); roupas com funcionalidades “especiais” (conectadas e respondentes a estímulos elétricos externos); roupas com dispositivos eletrônicos para monitoramento de sinais vitais e liberação controlada de fármacos (sensores de fibra óptica flexíveis e elásticos numa matriz têxtil de lã; sensores de toque com capacitores na forma de fibras); moda conectada (*connected couture*: tecidos e vestimentas que melhoram a *performance* em palcos e passarelas).
- iv. **Sensoriamento para Internet das Coisas:** sensores e atuadores, construídos com nanomateriais e/ou empregando métodos de nanotecnologia.
- v. **Nanotecnologia para energia:** tecnologia auxiliar (por exemplo, na indústria do petróleo, processos catalíticos de maior desempenho); novos materiais para baterias e geração de energia limpa, como nas células a combustível ou células fotovoltaicas (ou células solares); inovações em aparelhos portáteis e redes de sensores sem fio; além da área médica em que baterias podem ser usadas para fornecer energia a implantes e aparelhos médicos.
- vi. **Nanotecnologia para alimentos:** tecnologia habilitadora para garantir segurança alimentar; sensores e atuadores para monitoramento e automação na agricultura de precisão; processamento de alimentos, tanto em aplicações denominadas de “nanocomidas” (*nanofood*) como na manipulação de alimentos para aumentar tempo de estoque, incluir nutrientes, alterar textura, cor e gosto; alimentos “fabricados” com nanotecnologia.

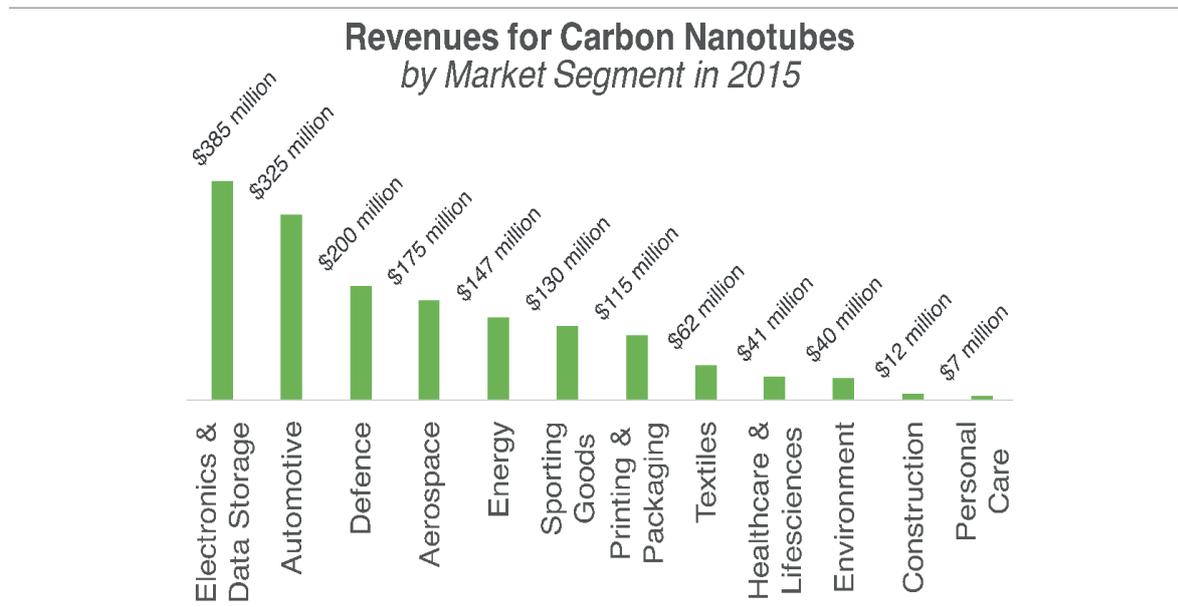
4.6.2 Evolução recente e prospectiva

Conforme anteriormente explicado (ver Figura 16), a evolução dos nanotubos de carbono em termos de custo é cadente, devido ao aumento da capacidade produtiva instalada. Um outro exemplo de material nanoscópico é o grafeno, cujo custo de produção é intrinsicamente barato devido ao seu baixo custo marginal de produção. Estima-se que o custo do grafeno fique abaixo do custo do silício em poucos anos.

Os mercados para aplicação de nanotecnologias são múltiplos, desde eletrônica e armazenamento de dados, passando por automotivo, aeroespacial e defesa, até construção e cuidados pessoais. A Figura 19 apresenta o tamanho dos diferentes segmentos de mercado para nanotecnologias em 2015, totalizando USD 1,64 bilhões. Já

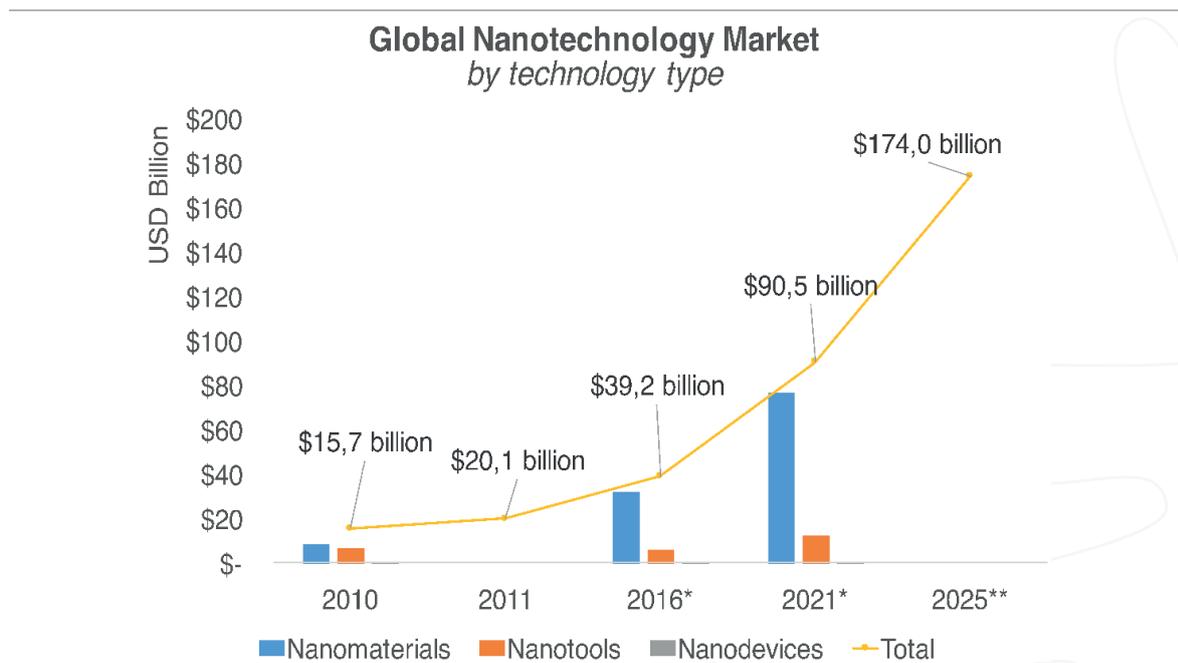
a Figura 20 indica o tamanho atual e potencial do mercado global de nanotecnologias por tipo de tecnologia.

Figura 19 – Mercados de Nanotecnologias



Fonte: Electronics CA

Figura 20 – Mercados de Nanotecnologias



* Estimativas de BCC Research (2016)

** Estimativa de Research and Markets (2016)

Fontes: BCC Research (2016) e Research and Markets (2016)

4.6.3 Potencial de uso genérico das inovações

Sendo uma tecnologia de amplo espectro, a nanotecnologia possui múltiplas aplicações. A seguinte categorização pode facilitar o entendimento de seus usos:

- i. **Nanomateriais:** estruturas em escala nano em forma não processada (nanopartículas, nanotubos, pontos quânticos, fulerenos, dendrímeros, materiais nanoporosos...).
- ii. **Nanointermediários:** produtos intermediários com características nano (revestimentos, tecidos, chips de memória e lógicos, meios de contraste, componentes ópticos, materiais ortopédicos, fios supercondutores...).
- iii. **Produtos habilitados por nanotecnologia** (*nano-enabled products*): produtos finais incorporando nanotecnologia (carros, roupas, aviões, computadores, dispositivos eletrônicos de consumo, produtos farmacêuticos, alimentos processados, recipientes de plástico, eletrodomésticos...).

4.7 Biotecnologia¹¹

O *cluster* Nanotecnologia se encaixa nas Categorias Analíticas da seguinte forma:

- i. **Tipos de Inovação:** Inovações de produto, insumos, processos e mercados. São inovações de produto que demandam inovações de processo e novos insumos e abrem novos mercados. Por modificarem a base técnica de conhecimentos sobre os fármacos tradicionais, as biotecnologias também podem implicar mudanças organizacionais nas empresas que buscam introduzi-los.
- ii. **Espectro de aplicação:** Tecnologias de aplicação específica. Trata-se do *cluster* com aplicações mais restritas a determinados sistemas produtivos, nomeadamente medicina, agroindústrias e química.
- iii. **Contribuição do Cluster para os demais:** MA, Nano. A contribuição das biotecnologias é restrita aos *clusters* MA (biomateriais) e Nanotecnologias (biologia molecular).
- iv. **Prospectiva tecnológica:** Convivência de tecnologias maduras e em mutação. Tecnologia de sequenciamento de DNA já é considerada madura; tecnologias de edição genética, tecnologias avançadas de manipulação celular (células tronco) que têm caráter disruptivo, ainda em estágio inicial de desenvolvimento, sujeito a mutações.
- v. **Natureza da inovação:** Incremental com potencial radical. As inovações de biotecnologia já estão estabelecidas e evoluem de maneira incremental. No entanto, quando de suas aplicações em setores específicos, podem se transformar em inovações radicais com potencial disruptivo.

11. Baseado no relatório de Moreira-Filho e Arruda (2017).

4.7.1 Caracterização

A biotecnologia é o conjunto de técnicas que usam organismos vivos ou suas partes para obter ou modificar os produtos para melhorar plantas ou animais ou para desenvolver microrganismos com fins claramente definidos, ou seja, para a obtenção de produtos e serviços. A biotecnologia moderna, seja ela vegetal, animal, industrial ou humana, depende basicamente das tecnologias “ômicas” (genômica, transcriptômica, proteômica e metabolômica), da Bioinformática e de um conjunto de técnicas de biologia molecular e celular. A Biotecnologia é usualmente classificada em três tipos principais de áreas de desenvolvimento biotecnológico, cada uma apresentando definição específica de seu escopo:

- i. **Biotecnologia vermelha** é a aplicação de biotecnologia na área da saúde humana, com uso de genômica, biologia molecular, tecnologia de imagem; Bioinformática/e-Science (*big data*), dentre outras.
- ii. **Biotecnologia verde** é a aplicação de biotecnologia na agricultura e na produção de alimentos, como melhoramento de variedades vegetais através da micro propagação, seleção com marcadores moleculares e utilização de DNA recombinante.
- iii. **Biotecnologia branca** é a aplicação de biotecnologia em processos industriais, como na aplicação de enzimas e organismos para processar e produzir compostos químicos, materiais e energia.

O *cluster* de biotecnologias apresenta uma dinâmica de convergência de diferentes tecnologias instrumentais: biotecnologia industrial, computação biológica, ciência de materiais, bioengenharia, bioengenharia ambiental, tecnologias habilitadoras, terapia humana e biotecnologia agrícola que se juntam no que é chamado “biotecnologia convergente” (Sager, 2001). No entanto, o Projeto i2027 concentra sua análise nas duas primeiras áreas da biotecnologia, que chamamos de “Biotecnologias de Aplicação Humana” (ou na Saúde Humana) e “Biotecnologias de Aplicação Vegetal e Animal”, respectivamente. Em suma, a biotecnologia para aplicação humana se beneficiou de avanços em biotecnologias e/ou bioprocessos instrumentais, permitidos pelo acúmulo de conhecimento e pela convergência tecnológica supracitada, tais como:

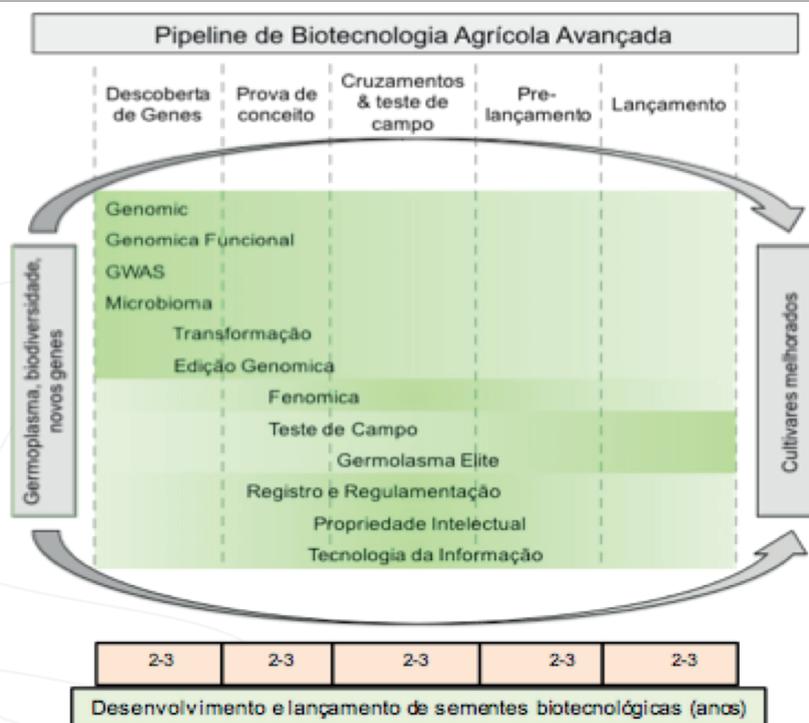
- Genômica.
- Biologia molecular.
- Medicina diagnóstica por imagem, incluindo radiogenômica, tecnologia de imagem óptica, e informática para imagem.
- Bioinformática/e-Science (*big data enabled medicine*), incluindo o uso de IoT e sensores para monitorar parâmetros médicos e aplicação de drogas (e ainda, *biochips* deglutíveis e biodegradáveis).
- Métodos avançados de bioprocessamento.
- Novos materiais.
- Nanotecnologia, com o uso de nanopartículas nas áreas de imagem, como contrastes, e de *drug delivery*, como carreadores de fármaco.

A combinação de tecnologias de genômica, biologia molecular e bioinformática tem permitido avanços significativos na compreensão do mecanismo molecular das doenças crônicas não transmissíveis, como câncer e doenças cardiovasculares, e na identificação de novos alvos terapêuticos. Uma tecnologia de diagnóstico recente é a biópsia líquida para diagnóstico de tumores (caracterização do tumor a partir de amostras sanguíneas).

A Biotecnologia apresentou um salto qualitativo em anos recentes com o desenvolvimento de técnicas de edição gênica mediada pela tecnologia *Crispr/Cas9* (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeat – CRISPR/CRISPR-associated nuclease protein – Cas*). Esta tecnologia está disponível em experimentos pioneiros para correção de doenças genéticas em seres humanos.

Na agricultura, a CRISPR-Cas tem sido utilizada com sucesso em culturas agrícolas importantes, incluindo arroz, milho, soja e trigo, e direcionada a diversos caracteres de interesse agrícola como tolerância a herbicidas e doenças e para a composição química e nutricional de grãos. A edição gênica, ao permitir alterar os genes presentes no genoma das próprias plantas sem introduzir em seus genomas sequências exógenas, diferencia-se da transgenia e escapa dos processos regulatórios. O desenvolvimento de um cultivar geneticamente modificado (biotecnologia agrícola) leva de dez a 15 anos (no caso das grandes empresas de biotecnologia), conforme indicado na Figura 21.

Figura 21 – Período de desenvolvimento de um cultivar geneticamente modificado



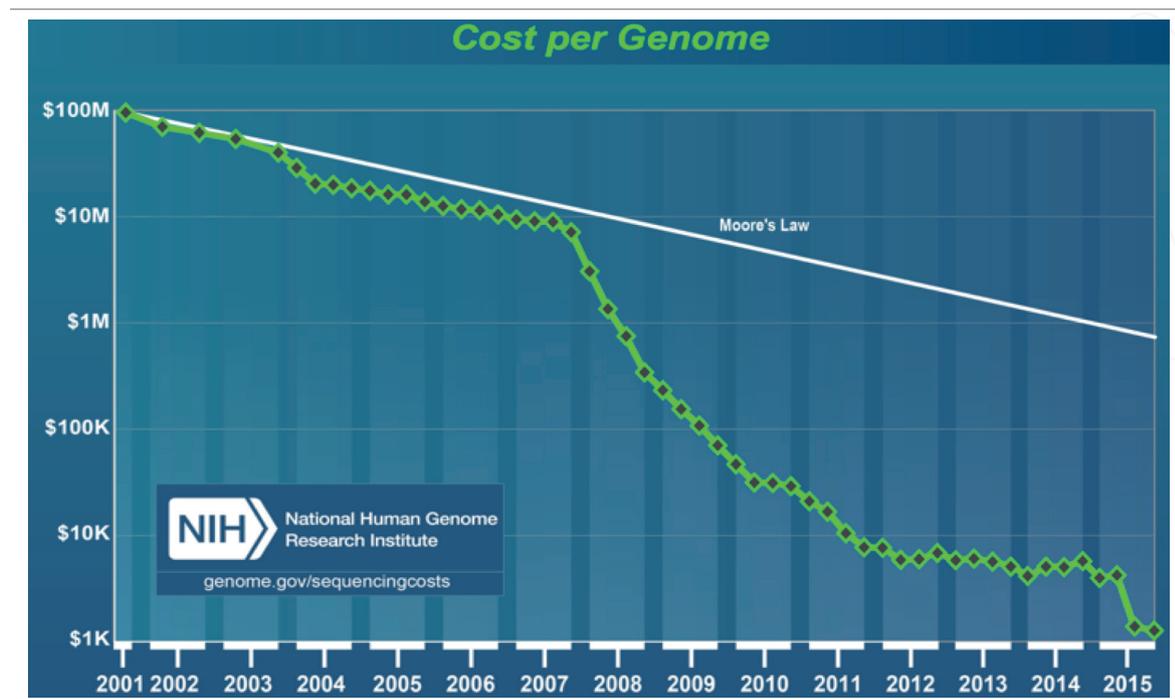
Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

Na genética animal, as tecnologias “ômicas”, embora aplicadas de forma incipiente no Brasil, já estão presentes na obtenção de matrizes de alta qualidade (seleção assistida por marcadores genômicos). A edição gênica para animais terá papel significativo nas próximas décadas, sobretudo com a possibilidade de reconstrução alélica, baseada no sequenciamento em larga escala, do mapeamento de alelos promissores em populações geneticamente diversas. Também deve ocorrer o sequenciamento de populações mais rústicas e melhor adaptadas às condições tropicais. Essas informações deverão contribuir para a identificação de genes ortólogos que servirão de base para a edição gênica em matrizes elites.

4.7.2 Evolução recente e prospectiva

O custo de sequenciamento do genoma (humano) apresentou evolução lenta nos primeiros vinte anos desde a descrição da estrutura do DNA em 1953. Apenas a partir de 1973, foi possível manipular moléculas de DNA utilizando enzimas de restrição, o que possibilitou a engenharia genética e o nascimento da biotecnologia moderna, culminando com o sequenciamento do DNA humano em 2001. Dentre os fatores cruciais para a aceleração desde a década de 1970 incluem-se: (a) desenvolvimentos simultâneos nas áreas de bioinformática, microquímica e novos materiais; e (b) parcerias entre academia e empresa nos EUA e Europa. Atualmente, o custo de sequenciamento do genoma humano cai a uma taxa (5x/ano) superior à da Lei de Moore (2x/ano); em 2016, o custo caiu abaixo de USD 1,000. Neste ritmo, o custo ficaria entre USD 1,00 e USD 0,01 por genoma em 2020 (Figura 22).

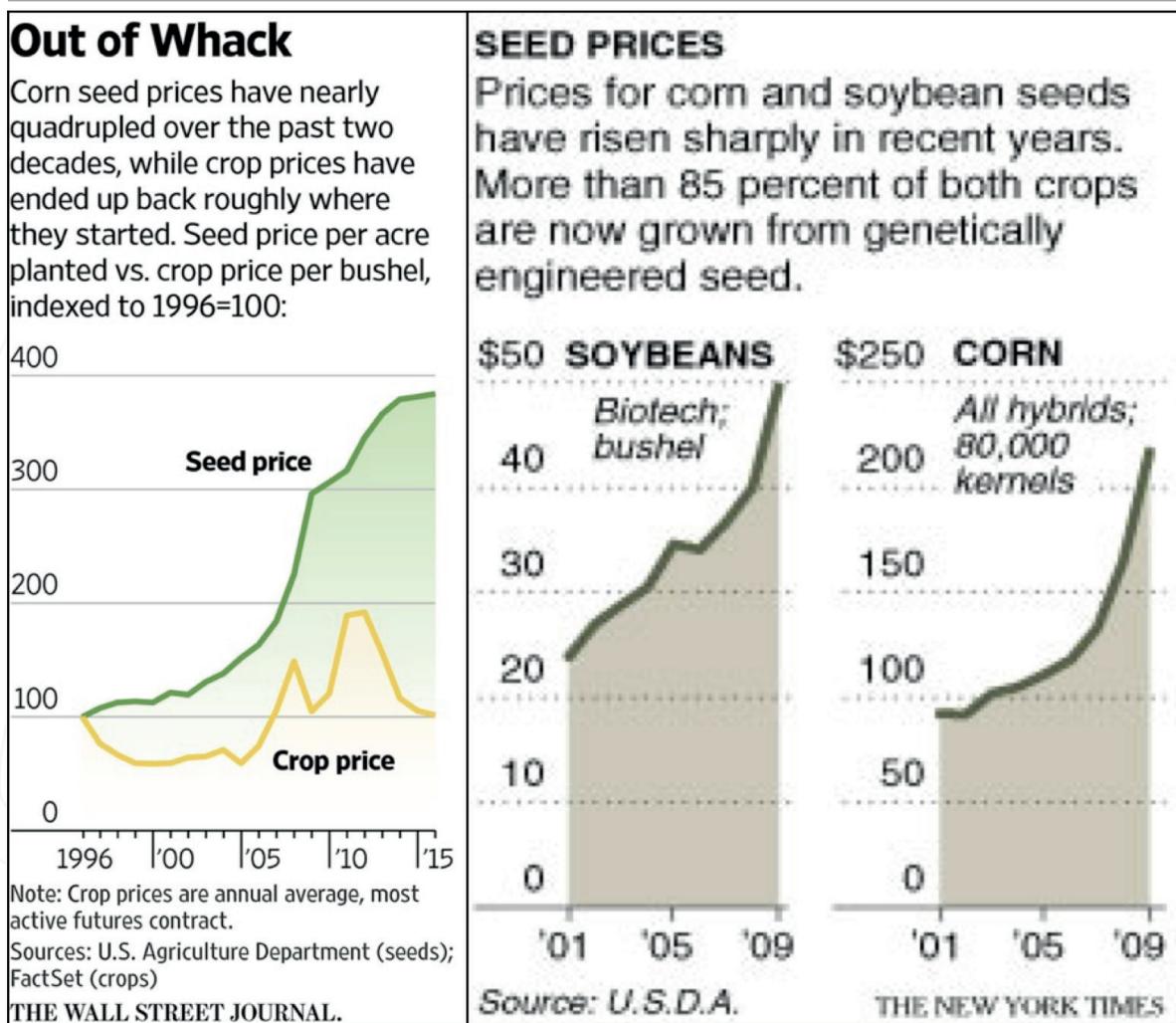
Figura 22 – Custo de sequenciamento do genoma humano



Fonte: <https://www.genome.gov/sequencingcostsdata/>

O custo de sementes geneticamente modificadas apresenta uma dinâmica distinta, ascendente. A subida de preço se deve, em parte, pela maior produtividade das sementes, o que, em tese, se pagaria, mas na verdade o valor é capturado pela indústria de sementes (Figura 23): há um oligopólio por trás do mercado de sementes. O produto é mais eficiente e cobram por isso no limite. Com a disseminação das novas técnicas de sequenciamento e edição, pequenas empresas poderão entrar no mercado porque a barreira regulatória tende a cair com as novas técnicas de transgenia. A biotecnologia pode, assim, ser “customizada” para o Brasil, aumentando a competição e diminuindo as margens de preço das sementes. Há, neste sentido, um potencial de entrada e uma disrupção do mercado. Em termos de difusão, estima-se que em 2017 mais de 75% da área cultivada de milho, algodão e soja nos EUA seja de safras transgênicas (com a soja alcançando quase 100% da área cultivada).

Figura 23 – Custo das sementes geneticamente modificadas



Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

4.7.3 Potencial de uso genérico das inovações

Dentre os principais usos dos bioprocessos e biotecnologias avançadas para a saúde humana (em uso e em desenvolvimento para uso em 5-10 anos), destacam-se:

- **Novo paradigma na medicina: “medicina de precisão”.** Adoção de terapias baseadas no mecanismo molecular da doença, utilização de biomarcadores (proteínas, DNA) para individualização da terapia e estratificação dos pacientes. Possibilidades crescentes de intervenção preventiva através da edição genética com utilização da técnica *Crispr/Cas9*.
- **Sequenciamento de DNA em sua quarta geração.** Utiliza métodos de *new generation sequencing* (NSG) – terceira geração – para o sequenciamento direto de DNA ou RNA em células e tecidos fixados, isto é, em material usado rotineiramente na patologia clínica, chegando ao limite do sequenciamento *in situ* de uma única célula isolada. Também utiliza tecnologia de **DNA microarrays**, em que pequenas lâminas de vidro contêm milhares de sondas de DNA que correspondem ao conjunto global de RNAs transcritos pelo genoma.

No caso de biotecnologia vegetal, destacam-se usos para:

- Aumentar colheitas.
- Tornar plantações mais resistentes a pragas e condições meteorológicas.
- Adaptar plantas a condições específicas de solo e clima.
- Tornar as plantas resistentes a pesticidas.

No caso da biotecnologia animal:

- Melhorar matriz gênica de rebanho e, principalmente, de corte.
- Aumentar produtividade de rebanhos leiteiros.
- Diminuir idade de abate.
- Melhorar imunologia de rebanhos, incluindo genética de espécies mais rústicas e mais bem adaptadas para condições de clima tropical e de doenças mais prevalentes nesses climas.

Na avicultura e suinocultura, existe um grande gargalo no controle mais efetivo das doenças virais – suas vacinas apresentam eficiência variável em função das linhagens virais, cuja diversidade varia de acordo com os diferentes pontos de produção.

4.8 Armazenamento de Energia¹²

O *cluster* Armazenamento de Energia se encaixa nas Categorias Analíticas da seguinte forma:

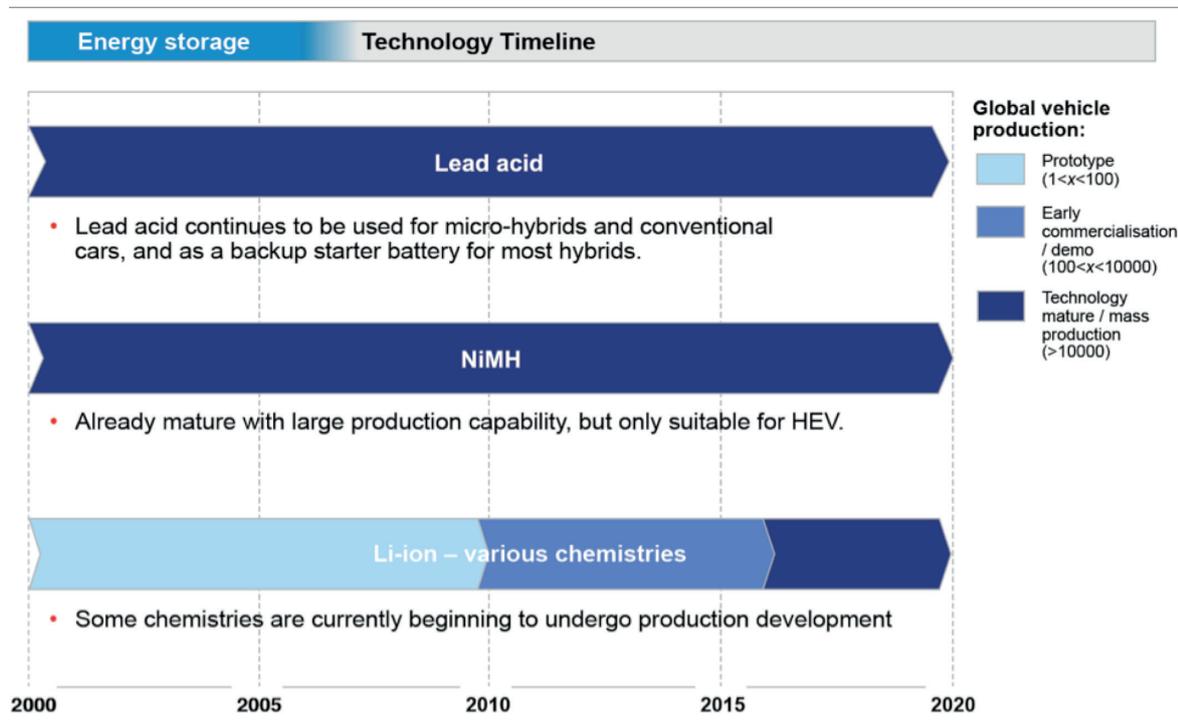
- i. Tipos de Inovação:** Inovações de produto, processo e de mercado.
São novos produtos que se compõem como insumos para outros produtos ou como produtos em si, introduzidos em processos industriais. Ao agirem desta forma, implicam a abertura de novos mercados.
- ii. Espectro de aplicação:** Tecnologias de propósito específico.
As aplicações das tecnologias de AE são específicas para eletrificação de sistemas produtivos ou produtos autônomos e para a conservação de energia.
- iii. Contribuição do *Cluster* para os demais:** IoT, Redes, PIC.
As inovações de AE (nomeadamente, baterias) são instrumentais para as inovações de IoT (por exemplo, dispositivos conectados portáteis, drones produtivos), Redes (fornecimento de energia ou segurança energética para grandes servidores) e PIC (sistemas produtivos autônomos).
- iv. Prospectiva tecnológica:** Convivência de tecnologias maduras e em seleção.
Prevalecem o uso de tecnologias maduras com uso em larga escala, por exemplo, no setor de eletrônicos, mas também nos primeiros modelos de automóveis elétricos, híbridos e com célula de combustível. Novas tecnologias ainda em diferentes graus de desenvolvimento (de pesquisa aplicada a prototipagem). Os principais gargalos tecnológicos para uso em alguns setores (principalmente automotivo) é conseguir uma bateria (1) atraente em termos de custo-*performance*; (2) rapidamente recarregável, o que requer rede de postos de recarga e/ou de troca de baterias (ativo complementar); e (3) segura, feita de material abundante, e reciclável.
- v. Natureza da inovação:** Predomina incremental.
As principais inovações (tipos de baterias) já estão estabelecidas e evoluem incrementalmente.

4.8.1 Caracterização

O Armazenamento Eletroquímico de Energia (AE ou AEE) corresponde à utilização de uma reação química (*reação redox*) para armazenar energia elétrica. É o campo tecnológico onde se utilizam métodos eletroquímicos para armazenar energia. Para se extrair energia elétrica de uma reação química, deve-se criar um dispositivo que permita o fluxo de elétrons pelo circuito externo. Há múltiplas possíveis combinações de elementos químicos para formar uma reação para AEE; ainda assim, o progresso de tecnologias AEE é relativamente lento (a Figura 24 apresenta a linha do tempo para três tecnologias principais).

12. Baseado no relatório de Torresi (2017).

Figura 24 – Linha do tempo das principais tecnologias de AEE



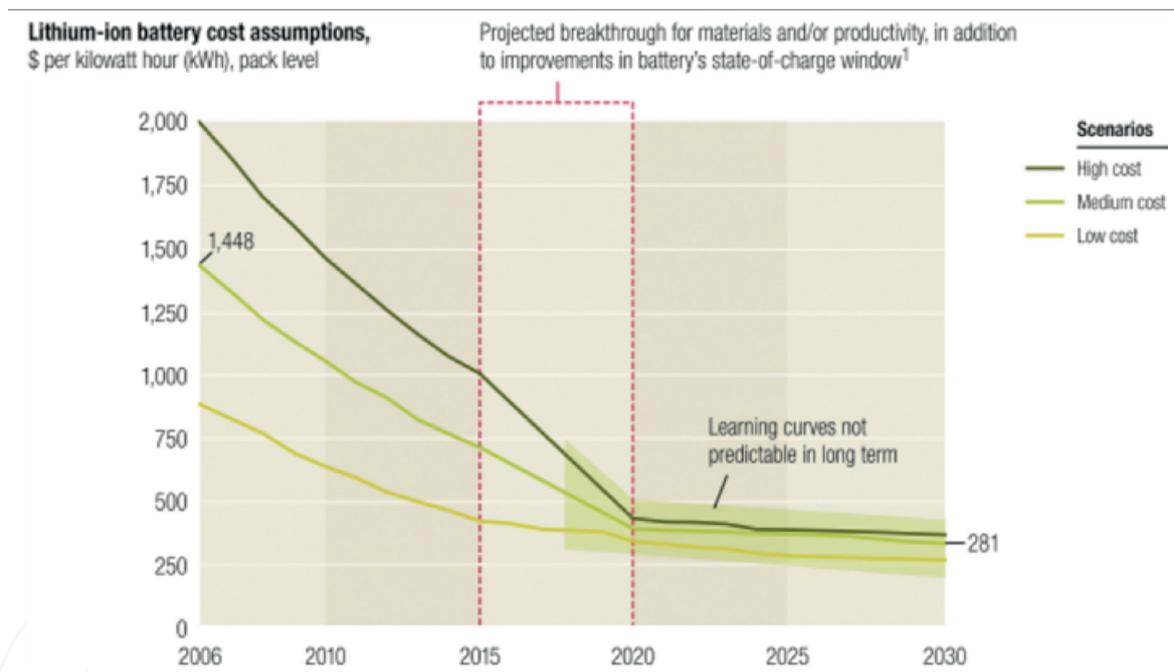
Dentre as tecnologias maduras, destacam-se: baterias de chumbo-ácido, baterias portáteis (li-ion), e células a combustíveis (aqui se trata de maturidade científico-tecnológica, mas com gargalos para sua difusão na economia). Com o rápido desenvolvimento da ciência dos materiais estão sendo realizadas pesquisas sobre novas tecnologias de armazenamento de energia baseadas em grafeno. Há também projetos demonstrativos, que abrangem a integração de redes de energia renovável, geração distribuída, microrredes, transmissão, distribuição e regulação de frequência. Até o final de 2015, as aplicações de AEE já estavam presentes em todos os segmentos dos sistemas de energia.

Cabe destacar as baterias íons-lítio, que são o tipo de bateria recarregável das mais utilizadas em equipamentos eletrônicos portáteis, mas também em automóveis elétricos, pois armazenam o dobro de energia que uma bateria de hidreto metálico de níquel (ou NiMH) – outra tecnologia de AEE madura.

4.8.2 Evolução recente e prospectiva

As baterias de íons-lítio apresentam custos cadentes, mas requerem avanços significativos para se difundirem plenamente na economia, principalmente para uso automotivo (Figura 25).

Figura 25 – Custo de pacotes de baterias de íon-lítio para uso automotivo



Fonte: Henseley et al (2009)

De maneira geral, o mercado de baterias (tecnologias de AEE) tende a se expandir globalmente, podendo chegar a USD 25 bilhões em 2020, de pouco mais de USD 10 bilhões em 2013.

4.8.3 Potencial de uso genérico das inovações

Tecnologias AEE podem ser utilizadas para três fins principais: **autonomia** de sistemas em relação à rede de eletricidade; **eletrificação de produtos e processos** outrora dependentes de combustível fóssil; **segurança das matrizes energéticas**. Exemplos:

- Autonomia de sistemas industriais.
- Eletrificação de automóveis.
- Integração de redes de energia renovável, geração distribuída, microrredes, transmissão, distribuição e regulação de frequência, bem como estabilização da oferta de energia elétrica.
- Substituição de fontes de energia voláteis por baterias com fornecimento estável.

Tais usos genéricos dependem de variáveis técnicas: (1) portabilidade (relação potência/peso); (2) duração da recarga; (3) potência máxima nominal e real; e (4) segurança de uso. **Quanto maiores estas variáveis, maior o potencial de uso e de impacto disruptivo: menor o custo, maior sustentabilidade (energética) e maior o poder disruptivo.** Além disso, quanto maiores a intensidade energética de uma atividade industrial e a disponibilidade de fontes alternativas de armazenamento de energia, mais crescentes são as vantagens de custos; maior a mobilidade de fatores de produção; maior é o aumento da sustentabilidade ambiental.



5 BALANÇO E IMPACTOS

5.1 Balanço

A partir das Categorias Analíticas utilizadas na análise de cada *Cluster Tecnológico*, ressalta-se, então, que a multiplicidade de tipos de inovação reforça o potencial transformador dessas tecnologias. Além disso, tecnologias associadas aos *clusters* com espectro amplo (IA, Redes, IoT, Nano) merecem atenção especial pela sua “horizontalidade” e as estratégias e políticas devem promover ecossistemas tecnológicos que potencializem as sinergias entre *clusters* e suas competências. Por outro lado, tecnologias em seleção e mutação adicionam maior imprevisibilidade ao progresso técnico dos *clusters*. Mesmo naqueles que possuem tecnologias maduras, a imprevisibilidade também está presente, ainda que em menor grau. Nesse sentido, a estratégia de primeiro movimento (*first mover strategy*) pode se tornar menos eficiente e efetiva do que a estratégia de seguidor veloz (*fast follower strategy*).

Ainda que o potencial disruptivo seja normalmente associado a inovações radicais, o acúmulo de inovações incrementais que fogem do paradigma tecnológico atual pode também levar à ruptura de estruturas de mercado no longo prazo. Assim, uma estratégia inicial na adoção e difusão de inovações incrementais pode se tornar meio eficaz para promover aprendizagem, capacitação e construção de competências que posteriormente poderão ser utilizadas para domínio das inovações radicais. Finalmente, a despeito do predomínio de situações de impacto moderado hoje com potencial disruptivo até 2027, em todos os *clusters* observam-se curvas de custo decrescentes e acentuadas das tecnologias-chave, o que permite acelerar as taxas de difusão das inovações. O Quadro 7, a seguir, sumariza as evidências analíticas obtidas a partir da construção do Mapa dos *Clusters Tecnológicos*.

Quadro 7 – Balanço dos *Clusters* Tecnológicos de Acordo com as Categorias Analíticas do Projeto Indústria 2027

Categoria Analítica	Balanço
Natureza da Inovação	<ul style="list-style-type: none"> • Inovações radicais são pouco frequentes e mais presentes no <i>Cluster</i> Nano. • Nos demais, há predomínio de inovações incrementais. • Há potencial de surgimento de inovações radicais no horizonte até 2027 em IA, <i>Big Data</i> e Nuvem; IoT; Produção Inteligente e Conectada; e Biotecnologia.
Contribuição do Cluster	<ul style="list-style-type: none"> • Convergências entre tecnologias de diferentes <i>Clusters</i> são a norma. • Destacam-se IA, <i>Big Data</i> e Nuvem; IoT; e Nano, que são instrumentais gerais.
Prospectiva Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> • De modo geral, convivem nos <i>Clusters</i> tecnologias em seleção e em mutação • Em IA, <i>Big Data</i> e Nuvem; e IoT há predomínio de tecnologias em mutação, o que induz a uma maior imprevisibilidade. • Em Redes; Materiais Avançados; Biotecnologias; e Armazenamento de Energia verifica-se relevância de tecnologias maduras.
Tipo de Inovação	<ul style="list-style-type: none"> • Os tipos de inovações são em geral variados, sendo que em IA e IoT ocorrem todos os tipos. • Em todos os <i>Clusters</i> são esperadas inovações criadoras de novos mercados, o que reforça o potencial transformador dessas tecnologias.
Espectro de Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Clusters</i> IA, <i>Big Data</i> e Nuvem; Redes, IoT; e Nano contemplam tecnologias de propósito geral. • Materiais Avançados; Biotecnologias; e Armazenamento de Energia abrigam tecnologias de propósito específico.
Intensidade do Impacto das Inovações	<ul style="list-style-type: none"> • Impactos muito diferenciados sobre os sistemas produtivos • Predomínio de situações de impacto moderado hoje com potencial disruptivo até 2027. • Exceções: <ul style="list-style-type: none"> - IA, <i>Big Data</i> e Nuvem cujo com impactos disruptivos já no presente. - Materiais Avançados e Armazenamento de Energia com impactos moderados no horizonte temporal de dez anos. <p>IMPORTANTE</p> <ul style="list-style-type: none"> • O decréscimo acentuado dos custos de adoção de tecnologias chave em todos os <i>Clusters</i> sinaliza para a aceleração da taxa de difusão das inovações. • Esta é a principal razão pela qual é crucial que as empresas brasileiras se mobilizem desde já em direção à incorporação destas inovações.

Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

- 1) Tecnologias resultam em tipos variados de inovações, sendo que em IA e IoT abrangem todos os tipos. Importante é que em todos os *clusters* são esperadas inovações criadoras de novos mercados.

Implicações sobre empresas e ecossistema de inovação: A multiplicidade de tipos de inovação reforça o potencial transformador dessas tecnologias.

Alertas: A onda de transformações está ainda no começo, o que traz amplas oportunidades, mas específicas a cada sistema produtivo.

- 2) O espectro de aplicação das inovações é variável, mas potencializado pela queda dos custos das tecnologias-chave. Contemplam tecnologias de propósito geral

– os *clusters* IA, *Big Data* e Nuvem; Redes, IoT e Nano. Já Materiais Avançados; Biotecnologias e Armazenamento de Energia abrigam tecnologias de propósito específico.

Implicações sobre empresas e ecossistema de inovação: Tecnologias associadas aos *clusters* com espectro amplo (IA, Redes, IoT, Nano) merecem atenção especial pela sua “horizontalidade”.

Alertas: Ainda que a queda de custos acelere a difusão das inovações em todos os sistemas relevantes, as aplicações se manifestam de forma específica a cada atividade industrial. Começar a se mover agora, definindo estratégias de ação, é imperioso.

- 3) Em todos os *clusters* as inovações tendem a resultar de processos de convergência tecnológica. Destacam-se IA, *Big Data* e Nuvem; IoT e Nano, que são instrumentais gerais.

Implicações sobre empresas e ecossistema de inovação: Estratégias e políticas devem promover ecossistemas tecnológicos que potencializem as sinergias entre *clusters* e suas competências.

Alertas: Deve-se ter cuidado para não dificultar ou negligenciar o desenvolvimento de tecnologias, os padrões técnicos e as competências que facilitem processos de convergência tecnológica e interoperabilidade.

- 4) De modo geral, convivem nos *clusters* tecnologias em seleção e em mutação. Em IA, *Big Data* e Nuvem e IoT, há predomínio de tecnologias em mutação. Já em Redes; Materiais Avançados; Biotecnologias e Armazenamento de Energia, verifica-se a convivência de tecnologias maduras relevantes com tecnologias em seleção e mutação.

Implicações sobre empresas e ecossistema de inovação: Tecnologias em seleção e mutação adicionam maior imprevisibilidade ao progresso técnico dos *clusters*; mesmo naqueles que possuem tecnologias maduras a imprevisibilidade também está presente, ainda que em menor grau.

Alertas: Em ambientes de alta incerteza e imprevisibilidade, a estratégia de primeiro movimento (*first mover strategy*) torna-se menos eficiente e efetiva do que a estratégia de seguidor veloz (*fast follower strategy*).

- 5) Inovações radicais são pouco frequentes e mais presentes no *Cluster* Nano. Nos demais, há predomínio de inovações incrementais com mudanças qualitativas. Nestes, há potencial de surgimento de inovações radicais no horizonte até 2027 em IA, *Big Data* e Nuvem; IoT; Produção Inteligente e Conectada; e Biotecnologia.

Implicações sobre empresas e ecossistema de inovação: Ainda que o potencial disruptivo seja normalmente associado a inovações radicais, o acúmulo de inovações incrementais que fogem do paradigma tecnológico atual pode também levar a ruptura de estruturas de mercado no longo prazo.

Alertas: Uma estratégia inicial na adoção e difusão de inovações incrementais pode se tornar meio eficaz para promover aprendizagem, capacitação e

construção de competências que posteriormente podem ser utilizadas para domínio das inovações radicais.

- 6) Impactos muito diferenciados sobre os diferentes sistemas produtivos. Há predomínio de situações de impacto moderado hoje com potencial disruptivo até 2027. Exceções estão em IA, *Big Data* e Nuvem, cujo impacto é disruptivo, e Materiais Avançados e Armazenamento de Energia, para os quais se esperam impactos moderados no horizonte temporal de 10 anos.

Implicações sobre empresas e ecossistema de inovação: Em todos os *clusters*, observam-se curvas de custo decrescentes e acentuadas das tecnologias-chave, o que permite acelerar as taxas de difusão das inovações.

Alertas: Apesar de incertezas, é preciso mover-se rapidamente agora.

5.2 Impactos dos *Clusters* Tecnológicos para a competitividade dos Sistemas Produtivos

O Quadro 8 abaixo resume os principais impactos vislumbrados pelos especialistas nos *Clusters* Tecnológicos estudados sobre os dez Sistemas Produtivos que tendem a sofrer com as inovações associadas a cada *Cluster* Tecnológico. Como mencionado na seção 3, os *insights* adiante exibidos constituem hipóteses de trabalho que serão exploradas a fundo na próxima etapa do Projeto Indústria 2027, dedicada aos estudos setoriais.

Quadro 8 – Impactos das Tecnologias Relevantes para a Competitividade dos Sistemas Produtivos

	Agro	Insumos Básicos	Química	Petróleo & Gás	Bens de Capital	Automotiva	Aeroespacial & Defesa	TICs	Bens de Consumo	Farma
Inteligência artificial										
Redes de Comunicação										
Internet das Coisas (IoT)										
PIC										
Materiais Avançados										
Nano										
Biotecnologia		n/a		n/a	n/a	n/a	n/a		n/a	
Armaz. de Energia										
Legenda:	n/a: não aplica		Impacto moderado em 2017 e em 2027		Impacto potencialmente disruptivo até 2027		Impacto disruptivo Em 2017 e até 2027			

Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

Examinando inicialmente as linhas do quadro, que correspondem a cada um dos oito *clusters*, nota-se que:

- Os *clusters* associados às tecnologias de informação e comunicação (TICs) – Inteligência Artificial, Redes de Comunicação, Internet das Coisas e Produção Inteligente e Conectada – de modo geral, parecem demonstrar impacto similar (potencialmente disruptivos) nos Sistemas Produtivos. As exceções são as Redes de Comunicação, passíveis de evoluções não disruptivas.
- Materiais Avançados e Biotecnologia (onde se aplica) são os que já implicam em impactos disruptivos em um maior número de Sistemas Produtivos. No entanto, Materiais Avançados, ao mesmo tempo, também impactam outros Sistemas de modo moderado e potencialmente disruptivo, dependendo do campo de materiais e suas aplicações.
- Inteligência Artificial, Internet das Coisas e Produção Inteligente e Conectada são os *clusters* que trazem impactos potencialmente disruptivos até 2027 para um maior número de Sistemas Produtivos, a depender de desenvolvimentos tecnológicos específicos condicionados à superação de gargalos tecnológicos específicos (ver seção 5.2).
- O *cluster* Armazenamento de Energias tem um maior número de impactos moderados nos Sistemas Produtivos, à exceção do sistema automotivo, e (potencialmente) dos sistemas de insumos básicos e de bens de capital.

Mirando o quadro pelos Sistemas Produtivos, a primeira constatação é que cada Sistema tende a ser impactado de forma distinta pelas inovações tecnológicas associadas aos oito *clusters* (colunas do Quadro 8). Mesmo assim, é possível derivar-se algumas conclusões gerais:

- O processo de transformação em todos os Sistemas Produtivos está em curso. De modo geral, entre os três tipos de impacto para os Sistemas Produtivos, prevalecem impactos potencialmente disruptivos.
- Todos os Sistemas, com a exceção de Insumos Básicos, estão diante de pelo menos um processo já disruptivo em 2017.
- Os sistemas Indústria Química, Petróleo & Gás e Bens de Capital tendem a sofrer impactos disruptivos já no curto prazo, advindos de dois *clusters*: Materiais Avançados e Biotecnologia (Química), Materiais Avançados e Nano (Petróleo & Gás) e Inteligência Artificial e Produção Inteligente e Conectada (Bens de Capital).
- O Sistema que deverá ter mais impactos moderados é o Farmacêutico. Porém, este impacto moderado está relacionado a *clusters* (Redes, IoT, PIC) que não são centrais ao modelo de negócio e ao padrão de concorrência do Sistema. Isto não significa que não devem ocorrer mudanças; ao contrário, o *cluster* Biotecnologia, central para o Sistema Farmacêutico, provocará impactos disruptivos no curto prazo, abrindo caminhos para mudanças em modelos de negócio, em padrões de concorrência e em estruturas de mercado. Além disso, o *cluster* Inteligência

Artificial poderá trazer impactos disruptivos na produção de medicamentos (inovação de processo); por exemplo, algoritmos podem ser utilizados para aperfeiçoar técnicas de *screening* e analisar resultados de testes clínicos.

- O único sistema que tende a não sofrer impactos disruptivos no curto prazo é o de Insumos Básicos. No entanto, predominam impactos potencialmente disruptivos até 2027, à exceção das inovações em materiais avançados e nanotecnologias, que tendem a otimizar a produção deste sistema.
- Ainda que de maneiras distintas, dadas as características díspares desses sistemas produtivos, os sistemas Aeroespacial & Defesa e de Bens de Consumo tendem a sofrer impactos de natureza bastante semelhante de cada *cluster* tecnológico. No curto prazo, esperam-se impactos disruptivos advindos do *cluster* Materiais Avançados apenas. Ainda que o sistema Aeroespacial & Defesa já adote algumas tecnologias de MA, deverão ocorrer grandes mudanças no modo de desenvolvimento de projetos das aeronaves, gerando oportunidade e desafios para fabricantes de aeronaves e aeroestruturas. No caso dos Bens de Consumo, o impacto das Nanotecnologias é, por sua vez, potencialmente disruptivo. Por fim, em ambos os sistemas, os impactos de AEE tendem a ser moderados.
- Sobre o Sistema Automotivo, apenas o *cluster* AEE exerce impactos disruptivos no curto prazo, enquanto apenas o *cluster* IoT impacta-o moderadamente. Os demais *clusters* trazem impactos cumulativos potencialmente disruptivos até 2027: IA, Redes, PIC, MA e Nano. No caso de tecnologias de Inteligência Artificial, por exemplo, impactos disruptivos poderiam surgir pela difusão do carro autônomo e do compartilhamento de automóveis (*car sharing*), que alterariam profundamente o modelo de negócio atual, centrado na propriedade individual de automóveis.
- Na agroindústria, a Biotecnologia traz impactos disruptivos no curto prazo, enquanto AEE e MA trazem impactos moderados ou otimizadores da produção. Os demais *clusters* trazem impactos cumulativos potencialmente disruptivos até 2027 sobre a Agroindústria: IA, Redes, IoT, PIC e Nano.
- Por fim, o sistema de Tecnologias de Informação e Comunicação recebe impactos disruptivos no longo prazo apenas de IoT, mas tende a receber impactos cumulativos potencialmente disruptivos até 2027 de cinco outros *clusters*: IA, Redes, PIC, MA e Nano. Para o sistema de TICs, são moderados os impactos advindos da biotecnologia e do AEE.

Em suma, nenhum sistema está livre de impactos disruptivos até 2027. Para vários poderão ocorrer mudanças significativas ainda no curto prazo. Estes *insights* iniciais, formulados a partir dos relatórios dos tecnólogos, serão detalhados na próxima etapa do Projeto Indústria 2027, a partir dos relatórios dos especialistas nos sistemas produtivos.

6 CONSTRANGIMENTOS À GERAÇÃO OU À DIFUSÃO DAS INOVAÇÕES E IMPLICAÇÕES DE POLÍTICA

6.1 Constrangimentos à geração ou à difusão das inovações e implicações para Políticas Públicas

Geração e difusão de novas tecnologias são afetadas por constrangimentos socio-econômicos diversos que, muitas vezes, exercem papel mais decisivo sobre trajetória e ritmo do progresso técnico do que determinantes tecnológicos e de mercado. Dentre esses constrangimentos, destacam-se:

- a. **Constrangimento éticos e/ou regulatórios:** dizem respeito a tecnologias que ameaçam valores éticos (por exemplo, liberdade de escolha) ou que requerem medidas regulatórias para proteção do indivíduo e suas propriedades (ou de empresas).
- b. **Constrangimentos normativos e/ou relativos a normas técnicas:** dizem respeito à necessidade de estabelecimento de normas técnicas ou padrões compartilhados, mesmo quando já há aplicação comercial da tecnologia (por exemplo, quando há competição entre padrões abertos vs. padrões proprietários).
- c. **Constrangimentos tecno-econômicos:** dizem respeito a capacitações técnicas e organizacionais adaptadas a cada sistema produtivo, especialmente à disponibilidade de ativos tecnológicos ou infraestruturas complementares para promover a difusão da tecnologia.
- d. **Constrangimentos sociais e/ou ambientais (socioambientais):** dizem respeito à percepção da sociedade sobre os riscos associados à produção ou ao uso das novas tecnologias, sejam eles baseados em fatores reais ou tão somente percebidos. Particularmente relevante nesse grupo é a dimensão da sustentabilidade.

A análise dos potenciais constrangimentos elencados pelos especialistas permite classificar os *clusters* em dois grupos (Quadro 9). O primeiro é composto pelos *clusters* cujas tecnologias estão associadas às TICs: Inteligência Artificial, Redes, IoT, Produção Inteligente. Nestes predominam questões ético-regulatórias e normativas (que são, de fato, relacionadas) – aqui, são importantes questões como liberdade de escolha; direito à privacidade e confidencialidade (propriedade e acesso) de dados; segurança pessoal e usos negativos sobre a vida do indivíduo. Além disso, também merecem consideração os constrangimentos relacionados ao grau de autonomia das máquinas; à responsabilização e penalização por violações de acesso a dados e usos indevidos, prejuízos ou acidentes; e à proteção de segredos industriais. Dentre os constrangimentos normativos, destacamos a incerteza em relação à definição de padrões abertos vs.

padrões proprietários, e a necessidade de se estabelecer proteção criptográfica (que endereçam diversos dos constrangimentos de natureza “ética”).

O segundo grupo é composto pelos *clusters* com tecnologias predominantemente físicas ou “materiais”: Materiais Avançados, Nanotecnologia, Biotecnologia, Armazenamento de Energia. Nestes, para além das questões ético-regulatórias (por exemplo, respeito à liberdade de escolha, à privacidade) e normativas (por exemplo, normas ambientais, disposição de resíduos), ressaltam-se também os constrangimentos tecno-econômicos: além da necessidade de se construírem capacitações técnicas e organizacionais adaptadas a cada sistema produtivo (o que também afeta o potencial do primeiro grupo de *clusters*), há constrangimentos específicos a determinados *clusters* por requererem ativos complementares – por exemplo, desenvolvimento da bioinformática de bancos de dados (*cluster* BIO); disponibilidade de redes de recarga para automóveis elétricos (*cluster* AE); tempo de recarga rápida e de duração (autonomia) (*cluster* AE).

Quadro 9 – Constrangimentos à geração ou à difusão das inovações, por grupo de *clusters* tecnológicos

Grupo A: Inteligência Artificial, Redes, IoT, Produção Inteligente

Ético-regulatórios:

- Liberdade de escolha. Direito à privacidade e confidencialidade de dados.
- Propriedade e acesso aos dados (indivíduos vs. empresas).
- Segurança pessoal e usos negativos sobre a vida do indivíduo. Proteção contra vandalismo e roubo de dados.
- Grau de autonomia das máquinas.
- Responsabilização e penalização por violações de acesso a dados e usos indevidos, prejuízos ou acidentes.
- Segredos Industriais.

Normativos:

- Padrões abertos vs. padrões proprietários.
- Normas técnicas para rastrear decisões.
- Proteção criptográfica.
- Disponibilidade, qualidade, integridade e tratamento dos dados.
- Compatibilidade e sensorização de *legacy systems*.

Tecno-econômicos:

- Capacitações técnicas e organizacionais adaptadas a cada sistema produtivo.

Socioambientais:

- Aceitação social principalmente no que tange questões de privacidade.
- Efeito sobre meio ambiente e saúde (antenas).
- Reciclagem e descarte de equipamentos, insumos e bens.

Grupo B: Materiais Avançados, Nanotecnologia, Biotecnologia, Armazenamento de Energia **Ético-regulatórios:**

- Regras e limitações a armamentos (materiais e nanotecnologia).
- Uso e manipulação de genomas humano e animal/vegetal.
- Respeito à liberdade individual de escolha e à privacidade.
- Segurança de organismos modificados.
- Poder econômico derivado de propriedade intelectual.

Normativos:

- Tecnologias abertas vs. tecnologias proprietárias.
- Prevenção de efeitos ambientais deletérios, normas de descarte e disposição de resíduos.
- Ausência ou lentidão de amadurecimento de normas técnicas.
- Rigidez de normas existentes como fator impeditivo à inovação.

Tecno-econômicos:

- Capacitações técnicas e organizacionais adaptadas a cada sistema produtivo.
- Desenvolvimento da bioinformática e custo-*performance* de processamento; aperfeiçoamento e adaptação de algoritmos para uso clínico.
- Desenvolvimento de bancos de biodados (biobancos).
- Disponibilidade de redes de recarga para automóveis elétricos.
- Tempo de recarga rápida e de duração (autonomia).

Socioambientais:

- Aceitação social principalmente no que tange questões de segurança.
- Riscos à saúde e descarte de materiais, nanotecnologia e biotecnologia.
- Reciclagem e descarte de equipamentos, insumos e bens.

Fonte: Elaboração Projeto Indústria 2027

6.2 Implicações para Políticas Públicas

A aplicação de tecnologias-chave em determinados setores industriais já está em curso em diversos países, cujas empresas concorrem diretamente ou podem vir a deslocar empresas brasileiras. É necessário que as empresas brasileiras, com urgência, introduzam em suas decisões estratégicas, planos de investimento nas inovações disruptivas relevantes para sua competitividade. A inação por parte do empresariado tornará muito difícil o processo de emparelhamento tecnológico, que é fundamental para diminuir o *gap* produtivo nacional frente aos países líderes em produtividade.

Países como Estados Unidos, Alemanha, China, Coreia do Sul e Japão, entre outros, possuem em curso estratégias para suas indústrias adotarem inovações associadas aos *clusters* objetos do Projeto Indústria 2027. Enquanto para alguns países, trata-se de um esforço incremental, uma vez que suas empresas já lideram a corrida tecnológica, para outros, é preciso desenhar e implantar estratégias específicas que possam permitir um emparelhamento ou mesmo um salto tecnológico (*leap frogging*). Para estes, estas tecnologias representam novos desafios que requerem, portanto, novos tipos de políticas públicas, com foco tanto na oferta, como na demanda: investir em capacidades para planejar, negociar, empreender, implementar e avaliar políticas públicas associadas a novas tecnologias são passos

importantes. Neste sentido são imprescindíveis o acompanhamento sistemático e a participação nos fóruns internacionais relativos ao estabelecimento de padrões, normas técnicas e códigos de conduta.

Mesmo que o Brasil se encontre relativamente atrasado em sua estratégia de adoção e difusão das inovações (potencialmente) disruptivas aqui analisadas, a análise do Projeto Indústria 2027 indica janelas de oportunidade ainda abertas e amplas. Ou seja, há espaço para que se façam, hoje, investimentos que levarão a aprendizagem, capacitação, e aquisição de competências.



ANEXO: CURRÍCULOS RESUMIDOS DOS CONSULTORES E ESPECIALISTAS CONSULTADOS

CLUSTER: INTERNET DAS COISAS

CONSULTOR RESPONSÁVEL:

Antônio Carlos Gravato Bordeaux Rego (<http://lattes.cnpq.br/5989160467865192>)

Engenheiro Eletrônico (PUCRJ/1974) e Bacharel em Física (PUCRJ/1974). Mestre em Física (Unicamp-IFGW/1977). Atualmente é Diretor Presidente e Sócio fundador da BXTEC – Consultoria em Tecnologia e Inovação Ltda. Consultor em projetos de inovação tecnológica junto a Centros de P&D nacionais e internacionais e empresas inovadoras em Tecnologia da Informação e Comunicação, principalmente em *Internet of Things* (IoT), Desenvolvimento de Produtos de SW e HW, Comunicações Ópticas, Telecomunicações, Modelos de Negócios e Projetos de P&D. Atualmente é Mentor no Programa FAPESP PIPE-*High-Tech Entrepreneurial Training Program* 2016 & 2017 para Startups. Diretor de Gestão da Inovação do CPqD de 2001 a 2013, responsável pela Gestão e Planejamento de todos Projetos de P&D do CPqD, pela Prospecção Tecnológica e Representação junto aos órgãos de fomento. Atua no CPqD como pesquisador em Comunicações Ópticas desde 1977.

ESPECIALISTAS CONSULTADOS:

Sergio Bampi (<http://lattes.cnpq.br/4010781324120944>)

Engenharia Eletrônica (UFRGS/1979), Bacharel em Física (UFRGS/1979), mestrado em Engenharia Elétrica – Microeletrônica – Stanford University (1982) e doutorado em Engenharia Elétrica na área de Microeletrônica – Stanford University (1986) Atualmente é Professor Titular do Instituto de Informática da UFRGS. Tem experiência na área de Engenharia da Computação e Engenharia Elétrica, com ênfase em *Hardware* e Microeletrônica.

Marcelo Soares Lubaszewski (<http://lattes.cnpq.br/5265254209364825>)

Engenharia Elétrica (UFRGS/1986). Mestre em Ciência da Computação (UFRGS/1990). Doutorado em Microeletrônica pelo Institut National Polytechnique de Grenoble, na França/1994. Realizou em 2001 um estágio de pós-doutoramento no Laboratoire d'Informatique, Robotique et Microélectronique de Montpellier, França, e em 2004 no Instituto Nacional de Microelectrónica de Sevilla, Espanha. É Professor Associado III da UFRGS desde 1990. Publicou mais de 200 artigos em conferências e revistas internacionais.

Foi coordenador e membro do Comitê Organizador/Comitê de Programa de mais de uma dezena de eventos patrocinados pela IEEE. Foi Editor-Chefe do Journal of Integrated Circuits and Systems (JICS). De abril de 2011 a setembro de 2016, esteve cedido à Empresa Pública CEITEC S.A. da área de semicondutores, onde atuou como Superintendente de Projeto de Circuitos Integrados e Relações Institucionais/Diretor de Tecnologia e Presidente da Empresa. Atualmente é Diretor do Zenit – Parque Científico e Tecnológico da UFRGS.

Sergio Takeo Kofuji (<http://lattes.cnpq.br/7716042222856938>)

Bacharel em Física (USP/1985), Mestrado em Engenharia Elétrica (USP/1988) e Doutorado em Engenharia Elétrica (USP/1995). Atualmente é Professor Doutor RIDP da Escola Politécnica da USP. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica e Ciência da Computação, com ênfase em Arquiteturas Avançadas de Computadores, atuando principalmente nos seguintes temas: Computação Pervasiva, Redes de Sensores Sem Fio, Grades Computacionais de Armazenamento (*DataGrids*, *GridServices*), Processamento Paralelo, Processadores (SMT, CMP, PIM), Simuladores de Processadores (Programação no Cell), Arquitetura Reconfigurável, Sistemas Ciber-Físicos e Embarcados, Imageamento IR, UWB e ondas milimétricas, Computação Móvel e Sem Fio, e Redes de Alta Velocidade.

CLUSTER: TECNOLOGIAS DE REDES

CONSULTOR RESPONSÁVEL:

Claudio de Almeida Loural (<http://lattes.cnpq.br/6117995799153611>)

Bacharel em Física pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUCRJ/1976) e Mestre em Ciências dos Materiais pelo Instituto Militar de Engenharia (1979). Pesquisador de Telecomunicações da Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPqD de 1981 a 2012, tendo trabalhado em Optoeletrônica, Comunicações Ópticas, Tecnologias de Serviços e Prospecção Tecnológica. Foi Gerente de Planejamento da Inovação do CPqD de 2001 a 2012. Professor-Mestre da Pontifícia Universidade Católica de Campinas entre 2004 e 2007, em cursos de Graduação e Especialização na área de Análise de Sistemas.

ESPECIALISTAS CONSULTADOS:

Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho (<http://lattes.cnpq.br/8587567074814594>)

Professora Associada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e professora visitante na Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. É Sloan Fellow 2002 pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology). Doutora em Redes de Computadores pela Escola Politécnica – 1996. É fundadora e diretora-geral do LASSU (Laboratório de Sustentabilidade em TI) e cofundadora e pesquisadora principal do LARC (Laboratório

de Arquitetura e Redes de Computadores), ambos laboratórios de pesquisa e ensino do Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais. Foi fundadora e coordenadora do CEDIR-USP (Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática) de 2009-2015. Foi assessora de TI da USP no período de 2010-2013 e diretora-geral do CCE-USP (Centro de Computação Eletrônica) no período de 2006-2010. Recebeu diversos prêmios como Prêmio Mário Covas em Inovação do Governo do Estado de São Paulo (2008, 2009 e 2010). Hoje, coordena diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento para os setores privado e público em Computação Verde, Eficiência Energética em TI, Governança de TI e Sustentabilidade na Cadeia Produtiva da Moda, Internet do Futuro, Computação em Nuvem, DMZ Científica e Segurança.

Marcelo Martins Werneck (<http://lattes.cnpq.br/9106754041376544>)

Formado em Engenharia Eletrônica (PUCRJ/1975). Obteve o MSc pelo Programa de Engenharia Biomédica da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/1977). Em 1978, ingressou para o Departamento de Eletrônica e Computação da UFRJ, onde é atualmente Professor Titular. Seu PhD foi obtido pela University of Sussex, no Reino Unido em 1985. Atualmente é coordenador do Laboratório de Instrumentação e Fotônica do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE, onde desenvolve pesquisas na área de instrumentação e transdutores a fibra óptica. Em 2014 participou do credenciamento na UFRJ e na CAPES do 13º Programa de Pós-Graduação da COPPE, o Programa de Engenharia de Nanotecnologia onde atua como Vice Coordenador e como pesquisador e docente na área de nanofotônica. Revisor das seguintes revistas internacionais: IEEE Sensors, IET-Generation, Transmission & Distribution, Journal of Lighthouse Technology, Optics Express, IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, Sensors & Actuators, entre outras.

João Henrique de Augustinis Franco (<http://lattes.cnpq.br/6817620856926534>)

Engenheiro eletrônico (Escola Politécnica da USP), com MBA (FGVSP) e especialização em gestão da qualidade (UNICAMP). Possui extensa experiência em telecomunicações, tendo trabalhado na Philips do Brasil, Telequipo e Promon Eletrônica antes de ingressar no CPqD Telebrás em 1982, quando iniciou sua participação no desenvolvimento de *software* das centrais da família TRÓPICO. Trabalhou na Fundação CPqD entre 1998 e 2010, atuando no planejamento de serviços de telecomunicações e de TI e participando de projetos de pesquisa aplicada apoiados pelo Funttel em segurança de informação e comunicação e em proteção de infraestruturas críticas. Consultor em segurança da informação. Coautor de cinco patentes depositadas no INPI. Coordenou o Fórum de Segurança da BRISA no biênio 1999/2000. Publicou vários artigos técnicos no Brasil e no exterior e participou de grupos de trabalho da UITT, CITELOEA, ABNT e PBQP.

CLUSTER: INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

CONSULTOR RESPONSÁVEL:

Eduardo Prado

Engenheiro Eletrônico (UFRJ/1977). Mestre em Ciências (COPPE-UFRJ/1979). Atualmente é desenvolvedor de novos negócios com experiência internacional e consultor de tecnologia com foco principal na inovação, inteligência artificial, *big data* em saúde, mobilidade, saúde digital, convergência, serviços móveis, MVNO (operadora virtual), *mobile payment/mobile banking*, tecnologia vestível (*wearable*), cidades digitais e aplicativos móveis (*mobile apps*). Destaque atual para análise de novos negócios no segmento de Mobilidade (*Mobile Health, Mobile Apps e Mobile Learning*), *Big Data* em Saúde e *Internet of Things* (IoT). No segmento de IoT, tem atuado em vários nichos: saúde, casa inteligente, infraestrutura pública, entre outros.

ESPECIALISTAS CONSULTADOS:

Anderson da Silva Soares (<http://lattes.cnpq.br/1096941114079527>)

Doutorado em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Atualmente é professor do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, onde é membro permanente dos programas de Mestrado e Doutorado (vice coordenador 2015/2016) em Ciências da Computação. Atua como editor associado do *Journal of Computer Science* desde 2015. No campo de pesquisa e inovação, trabalha nas áreas de aprendizado de máquina, *deep learning* para *big data* e seleção de variáveis utilizando heurísticas. Fundador da comunidade Deep Learning Brasil e cofundador da comunidade *Big Data GO*. Atualmente desenvolve projetos de pesquisa e inovação com as seguintes empresas: grupo Heurys tecnologia (líder científico da data-H) e Copel Distribuição. Como atividade de extensão, foi coordenador da Olimpíada Brasileira de Robótica no estado de Goiás para alunos do ensino fundamental e médio entre 2013 e 2016, função que acumulou no Distrito Federal nos anos de 2013 e 2015. Na robótica é um dos mantenedores e entusiastas do núcleo de robótica Pequim Mecânico para nível universitário. www.inf.ufg.br/~anderson

Alexandre Gonçalves Evsukoff (<http://lattes.cnpq.br/6443456845137235>)

Engenharia Mecânica (UFRJ/1990), mestrado em Engenharia Mecânica (Coppe-UFRJ/1992) e doutorado em Automação e Controle no Institut National Polytechnique de Grenoble, França, em 1998. Desde 2002, é Professor do Programa de Engenharia Civil da Coppe/UFRJ, tendo como foco de pesquisa o desenvolvimento de técnicas de inteligência computacional para modelagem de sistemas complexos em aplicações de mineração de dados, de texto e da *web*. Nos últimos anos, vem trabalhando ativamente em projetos de P&D em colaboração com a indústria nas áreas de petróleo, energia, meio ambiente e telefonia. Recentemente, vem desenvolvendo pesquisas no

tema de Cidades Inteligentes com foco em aplicações de grandes bases de dados para solução de problemas de mobilidade urbana, segurança, etc.

CLUSTER: PRODUÇÃO INTELIGENTE

CONSULTOR RESPONSÁVEL:

Ricardo Manfredi Naveiro (<http://lattes.cnpq.br/4633694457560431>)

Engenharia Mecânica (PUCRJ/1972), Mestre em Engenharia de Produção (UFRJ/1979) e Doutor em Projeto do Produto pela Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (USP/1991). Pós-doutorado no Departamento de Engenharia Industrial da North Carolina State University – 1994; pós-doutorado junto ao Grupo de Sistemas de apoio à decisão na Universidade Paris VI – 2001. Professor visitante da Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Metiers em 2008 e professor visitante na Université de Technologie de Troyes em 2011. Atualmente é professor titular da Escola Politécnica/UFRJ. Tem atuado nos temas de gestão de desenvolvimento de novos produtos, gestão tecnológica, projeto orientado à manufatura e difusão de novas tecnologias em projeto e produção.

ESPECIALISTAS CONSULTADOS:

Eduardo de Senzi Zancul (<http://lattes.cnpq.br/3322414202275652>)

Engenheiro Mecânico (USP/1997), mestre em Engenharia de Produção (USP/2000) e doutor em Engenharia de Produção pela Escola de Engenharia de São Carlos (USP/2009). Professor da Escola Politécnica (POLI) da Universidade de São Paulo (USP), atuando no Departamento de Engenharia de Produção. Vice coordenador do InovaLab@POLI – complexo laboratorial focado no aprimoramento do ensino prático de graduação em engenharia. Pesquisador do Observatório da Inovação e Competitividade (OIC). Apoia atividades de empreendedorismo na POLI, participando de projetos PIPE-FAPESP. Membro pro bono do Conselho de Cursos de Engenharia do Insper. É Fellow da Fundação Lemann. Foi pesquisador assistente do Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) da RWTH Aachen University entre 2005 e 2007. Atualmente atua em pesquisa em gestão do desenvolvimento de produtos, Product Lifecycle Management (PLM), *design thinking*, manufatura avançada, manufatura aditiva e ensino de engenharia.

Glauco Augusto de Paula Caurin (<http://lattes.cnpq.br/4944670560700547>)

Engenheiro Mecânico com ênfase em Mecânica Fina (EESC – USP/1988). Possui um Nachdiplomstudium in Mechatronik (1990) e doutorado pelo Institut für Robotik – Eidgenössische Technische Hochschule – ETH – Zurique Suíça (1994). Entre 2010 e 2011, realizou um período sabático no Newman Laboratory for Biomechanics and Human Rehabilitation – Department of Mechanical Engineering do Massachusetts Institute of Technology – MIT – EUA. Atualmente é Professor Associado Nível 3 no Departamento de

Engenharia Mecânica da EESC – USP. Atua com projetos e implementação de sistemas mecatrônicos: manipuladores e mãos robóticas, sistemas mecatrônicos de tempo real, automação industrial e reabilitação robótica combinada com jogos computacionais.

Anderson Vicente Borille (<http://lattes.cnpq.br/3134837836618744>)

Engenharia Mecânica (UFSC/2003) e Mestrado (UFSC/2005). Entre 2005 e 2009, atuou como pesquisador no Centro de Competência em Manufatura, CCM, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), desenvolvendo doutorado. Neste período, atuou como pesquisador assistente no Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und – automatizierung – IFF e no Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie – IPT. Desde 2010, é professor do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Tem atuado no desenvolvimento de projetos de pesquisas com indústrias de diversos setores, como aeronáutico e automotivo, com ênfase em processos de fabricação, especialmente usinagem e processos de manufatura aditiva (RP & RM).

CLUSTER: BIOTECNOLOGIAS E BIOPROCESSOS

CONSULTORES RESPONSÁVEIS:

Carlos Alberto Moreira Filho (<http://lattes.cnpq.br/9210082685322439>)

Biologia (USP/1974), mestrado (USP/1977) e doutorado em Genética (USP/1980). Pós-doutorado pela University of Wisconsin e Cornell University Medical College (1982-84). Livre-Docente em Pediatria pela Faculdade de Medicina (USP/2009). Foi professor dos Institutos de Biociências e de Ciências Biomédicas da USP (1978-2009). Foi pesquisador visitante do Institut Pasteur, Paris, França (1984-2001) e membro do conselho diretor do AMSUD-Pasteur (2002-2004). É Professor Associado do Departamento de Pediatria da Faculdade de Medicina da USP (desde 2009), onde coordena o Laboratório de Genômica Pediátrica. Foi membro do Conselho Diretor do Instituto da Criança HC-FMUSP (2011 – 2014) e Coordenador do NAP Centro de Pesquisas em Biotecnologia da USP (1996-2014). É vice-coordenador do NAP de e-Science da USP (2012-2016). Tem experiência na área de Genética, com ênfase em Genética Humana e Médica, desenvolvendo projetos em biotecnologia, genômica de doenças complexas e biologia de sistemas.

Paulo Arruda (<http://lattes.cnpq.br/9849354538615385>)

Biologia pela Universidade Católica de Campinas, professor na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) no Departamento de Genética e Evolução, Instituto de Biologia. Na UNICAMP, iniciou trabalhos de pesquisa em genética fisiológica de plantas e fez mestrado e doutorado em genética. Entre 1982 e 1983, realizou pós-doutorado no Biochemistry Department, Rothamsted Experimental Station, Inglaterra. De volta ao Brasil em março de 1983, iniciou um grupo de pesquisa em biologia molecular de plantas. A partir de 1987, coordenou a implantação do Centro de Biologia Molecular

e Engenharia Genética (CBMEG) da UNICAMP para o desenvolvimento de grupos de pesquisa em biologia molecular principalmente na área vegetal. Possui 99 trabalhos em revistas científicas internacionais de alto impacto. Colaborou na organização do Programa Genoma FAPESP, estruturando o projeto de sequenciamento do genoma da bactéria *Xylella fastidiosa*. Coordenou o Projeto Genoma da Cana de Açúcar (SUCEST). Coordena também um grupo de Educação em Ciências com apoio da Fundação VITAE, FAPESP, CAPES e FINEP. É membro titular da Academia Brasileira de Ciências e Membro da Ordem Nacional do Mérito Científico na classe de Comendador. Na área de editoria científica, é revisor de revistas científicas internacionais, membro do corpo editorial da revista *Tropical Plant Biology* publicada pela Springer, New York e editor associado da revista *The Plant Genome*, uma publicação da Crop Science Society of America. No âmbito do desenvolvimento tecnológico, foi sócio fundador da empresa Alellyx Applied Genomics, a primeira empresa brasileira de genômica vegetal aplicada.

ESPECIALISTAS CONSULTADOS:

Maria Antonieta Peixoto Gimenes Couto (<http://lattes.cnpq.br/6932332009485079>)

Engenharia Química (UFRJ/1984), mestrado em Tecnologia de Processos Bioquímicos (UFRJ/1990) e doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos (UFRJ/2002). Atualmente é professora associada da Universidade Federal do Rio de Janeiro, lotada na Escola de Química, atuando nos cursos de graduação em Engenharia de Bioprocessos, Engenharia Química, Engenharia de Alimentos e Química Industrial. Integra o corpo docente permanente do Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos (TPQB) e do Programa de Engenharia Ambiental (PEA – UFRJ). Em pesquisa e pós-graduação, desenvolve e orienta trabalhos relacionados ao aproveitamento de biomassas residuais da produção de biocombustíveis e de alimentos com base no conceito de biorrefinarias e produção integrada. É membro do Corpo Docente do Programa de Engenharia Ambiental na Indústria de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (PRH-41 – ANP) e da Escola Brasileira de Química Verde.

Ayla Santana da Silva (<http://lattes.cnpq.br/4476123801492144>)

Ciências Biológicas: Microbiologia e Imunologia (UFRJ/2007), mestrado (UFRJ/2010) e doutorado pelo Programa de Pós-graduação em Bioquímica (UFRJ/2013). Atuou em diversos projetos de colaboração internacional. Ficou um ano na Universidade de Lund, Suécia, (2006-2007) com uma bolsa concedida pela União Europeia. Parte do mestrado e o doutorado foram realizados no National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), no Japão, entre 2008 e 2011, onde trabalhou por cerca de dois anos. Esteve por dois meses no Centro de Investigações Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), na Espanha (2012), onde desenvolveu atividades do Projeto Proethanol 2G. Desde 2013 é pesquisadora no Instituto Nacional de Tecnologia (INT/MCTI). Tem experiência na área de microbiologia, biocatálise e biotecnologia, com ênfase em microbiologia industrial. Recebeu prêmios acadêmicos, incluindo o Prêmio

CAPES de Tese 2014 pela melhor tese de doutorado defendida em 2013 na área de biotecnologia no Brasil.

CLUSTER: NANOTECNOLOGIA

CONSULTOR RESPONSÁVEL:

Oswaldo Novais de Oliveira Junior (<http://lattes.cnpq.br/8582867831317500>)

Física, doutorado na University of Wales, Bangor, Reino Unido. Professor do Instituto de Física de São Carlos, USP. Publicou cerca de 490 artigos em periódicos especializados, 15 capítulos de livros, dois livros de divulgação científica, um livro sobre escrita científica em inglês, tendo submetido sete pedidos de patentes. É membro fundador do Núcleo Interinstitucional de Linguística Computacional (NILC), que desenvolveu o revisor gramatical ReGra, agraciado com dois prêmios de inovação tecnológica e disponível mundialmente com o processador de texto Word for Windows. Suas principais áreas de atuação são em filmes orgânicos nanoestruturados, tópico de física da matéria condensada, e processamento de línguas naturais. É membro da Academia de Ciências do Estado de São Paulo. Pertence ao comitê editorial de quatro revistas, sendo também editor associado da revista Journal of Nanoscience and Nanotechnology e da revista Display and Imaging. Recebeu o Prêmio Scopus 2006, outorgado pela Elsevier do Brasil e a Capes, como um dos 16 pesquisadores brasileiros com maior produção científica, com base no número de publicações, citações e orientações.

ESPECIALISTAS CONSULTADOS:

Nelson Eduardo Duran Caballero (<http://lattes.cnpq.br/6191239140886028>)

Química (Universidade Católica de Valparaíso/1967) e doutorado em Química (University of Porto Rico/1972). Atualmente é professor convidado voluntário (aposentado) da Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na área de Bioquímica, com ênfase em Biotransformação, atuando também nos seguintes temas em Nanotecnologia de Fármacos e Cosméticos: Nano e Micropartículas, Nanobiotecnologia, Nanotoxicologia, Biotecnologia Ambiental: Enzimas, tratamento de efluentes, lodo ativado, ozonização.

Ado Jorio de Vasconcelos (<http://lattes.cnpq.br/0034894070455412>)

Professor Titular no Departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais, trabalha com pesquisa e desenvolvimento de instrumentação científica em óptica para o estudo de nanoestruturas com aplicações em novos materiais e biomedicina. Recebeu os prêmios Somiya Award da International Union of Materials Research Societies (2009), Scopus Brasil da Elsevier&CAPES (2009), ICTP Prize (2012), Georg Forster Research Award da Humboldt Foundation (2015) e Medalha da Inconfidência do Governo do Estado de Minas Gerais (2016). É membro da Sociedade Brasileira de Física e da Academia Brasileira de Ciências. Recebeu o "membership award to the

American Chemical Society” (2015). Em 2016 foi incluído na lista dos “Highly Cited Researchers” da Thomson Reuters. Ocupou os cargos de Coordenador de Estudos Estratégicos e Informação no Inmetro (2008-2009) e, na UFMG, de Diretor da Coordenação de Transferência e Inovação Tecnológica (2010-2012), chefe do Departamento de Física (2015-2016), e Pró-Reitor de Pesquisa (2016-).

Adalberto Fazio (<http://lattes.cnpq.br/2714004273523549>)

Professor Titular do Instituto de Física da USP, Bacharel e Mestre em Física pela Universidade de Brasília (UnB/1973 e 1975). Doutor em Física (USP/1978). Em 1985, tornou-se Livre-Docente no Instituto de Física da USP e, desde 1991, é Professor Titular da instituição. Foi pesquisador visitante no National Renewable Energy Laboratory (EUA) e no Fritz-Häber-Institut (Berlim, Alemanha). É pesquisador I-A do CNPq. Ocupou os cargos de Secretário, Secretário-Geral, Vice-Presidente e Presidente da Sociedade Brasileira de Física (SBF) e Conselheiro da SBF. Foi Chefe do Departamento de Física dos Materiais e Mecânica e Vice-Diretor do Instituto de Física da USP. É membro da Academia Brasileira de Ciências e Consultor da Área de Ciências Físicas da Academia. Em 2006, recebeu a comenda da Ordem Nacional do Mérito Científico. No ano de 2008, foi nomeado membro do Conselho Superior da CAPES e cedido para a Universidade Federal do ABC para exercer o cargo de Diretor do Centro de Ciências Naturais e Humanas daquela instituição. Em agosto de 2008, foi nomeado Reitor Pro Tempore da Universidade Federal do ABC. Ainda em 2010, foi promovido à Classe da Grã-Cruz, na Ordem Nacional do Mérito Científico. Em outubro de 2013, foi eleito Membro da TWAS (The World Academy of Sciences). No período de março de 2014 a abril de 2015, exerceu a função de Diretor do Instituto de Física. Em 14 de maio de 2015, assumiu a Subsecretaria de Coordenação das Unidades de Pesquisa do MCTI. Desde março de 2016, desenvolve atividades de pesquisa, ensino, orientação e supervisão de projetos de pós-graduação e pós-doutorado na Universidade Federal do ABC. Possui mais de 300 publicações em revistas especializadas.

CLUSTER: MATERIAIS AVANÇADOS

CONSULTOR RESPONSÁVEL:

Antonio José Felix de Carvalho (<http://lattes.cnpq.br/5050955206618507>)

Química (USP/1986), mestrado em Físico-Química (USP/1991) e doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais (USP/2002). Experiência em indústria, onde atuou na área de processamento de termoplásticos, síntese de polímeros de elevada resistência térmica e géis e lubrificantes. Atualmente é professor Associado Livre Docente do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Tem experiência na área de ciência e engenharia de materiais. É membro do corpo editorial dos periódicos Industrial Crops and Products e Journal of Renewable

Materials e Conselheiro da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais SBPMat 2014-2018.

ESPECIALISTAS CONSULTADOS:

Wang Shu Hui (<http://lattes.cnpq.br/7984507949644750>)

Engenharia Química (UERJ/1979), mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros (URFJ/1986), doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros (UFRJ/1995) e pós-doutorado pela University of Massachusetts System (1997). Atualmente é Professor Associado da Universidade de São Paulo. Revisor de periódico da Polymer International, da European Polymer Journal, da Journal of Applied Polymer Science, da Polímeros, da Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, da Synthetic Metals, da Polymer Engineering and Science e Pesquisador colaborador da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Materiais Não Metálicos. Atua principalmente nos seguintes temas: anfifílico, biodegradável, blendas poliméricas, Bloco, caracterização e Comportamento das Fases.

Edgar Dutra Zanotto (<http://lattes.cnpq.br/1055167132036400>)

Engenheiro de Materiais (Universidade Federal de São Carlos/1976), mestre em Física (IFQSC-USP-São Carlos/1979), doutor em Glass Tech/University of Sheffield, UK (1982). Especialização em Polymers/International School of Polymer Science, Ferrara, Itália, 1992. Cientista visitante (Fullbright Fellow) nas universidades do Arizona (1987) e Florida Central (2005), USA. Professor titular da Universidade Federal de São Carlos. Publicou cerca de 230 originais e artigos de revisão, 21 capítulos de livros, três livros, cinco prefácios de livros; solicitou 20 patentes e orientou cerca de 75 teses. Seu foco de pesquisa (cristalização de vidros de óxido) ocupa o primeiro lugar no SCOPUS com as palavras-chave “vidro de nucleação de crescimento de cristal”. É editor do Journal of Non-Crystalline Solids e membro do Conselho Consultivo do Journal Applied Glass Science, da Bio Med Glasses, do MRS Bulletin (editor convidado), da J. Mat. Science (editor convidado), da Materials Research, da Bulletin Sociedad Espanhola de Ceramica y Vidrio e da Iranian J.M.S&T. É membro da Academia Brasileira de Ciências, da Academia de Ciências do Estado de São Paulo, da Academia Nacional de Engenharia e da The World Academy. Seus prêmios incluem o mais importante prêmio brasileiro e três dos mais importantes prêmios internacionais de pesquisa sobre vidro (Zachariasen Award, Gottardi Prize and Morey Award). Classificado como pesquisador nível 1A (superior) pela CNPq. Coordenador adjunto de Ciências Exatas e Engenharia na Fapesp; Gerente do escritório de patentes e licenciamento da Fapesp. Conselheiro emérito e diretor da Sociedade Brasileira de Cerâmica; Membro do Conselho de Pesquisa da UFSCar. Representante brasileiro na International Ceramic Federation; membro do Conselho da International Commission on Glass e da American Sociedade cerâmica.

CLUSTER: ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

CONSULTOR RESPONSÁVEL:

Roberto Manuel Torresi (<http://lattes.cnpq.br/6248532093883975>)

Físico-Química (1980) e doutorado em Ciências Químicas (1986) pela Universidade Nacional de Córdoba, Argentina. Realizou seu pós-doutorado na Universidade Pierre et Marie Curie, Paris, França, entre 1988 e 1990. Entre 1990 e 1993, foi professor visitante no Instituto de Física da UNICAMP, Campinas, e a partir de 1994, integrou-se como professor doutor ao Instituto de Química de São Carlos (USP), onde permaneceu até 2002. Atualmente é professor titular no Instituto de Química da Universidade de São Paulo e editor associado do Journal of the Brazilian Chemical Society. Tem experiência na área de Química, com ênfase em Eletroquímica, atuando principalmente nos seguintes temas: líquidos iônicos a temperatura ambiente, microbalança a cristal de quartzo, eletrodos modificados com materiais inorgânicos, orgânicos ou híbridos, baterias de íon-lítio e eletrointercalação.

ESPECIALISTAS CONSULTADOS:

Edson Antonio Ticianelli (<http://lattes.cnpq.br/0706356412303657>)

Química com doutorado em Físico-Química (USP/1985). Atualmente é Professor Titular – MS6 da Universidade de São Paulo, tendo sido Diretor do Instituto de Química de São Carlos entre 2006 a 2010. Foi eleito Membro Titular da Academia de Ciências do Estado de São Paulo (ACIESP) a partir de 2012 e da Academia Brasileira de Ciências a partir de 2013. Publicou dois livros e 195 artigos em periódicos. Possui um produto tecnológico registrado, três processos ou técnicas registrados e outros 360 itens de produção técnica, incluindo trabalhos em congressos. Atua na área de Química, com ênfase em Eletroquímica. Em seu currículo Lattes, os termos mais frequentes na contextualização da produção científica, tecnológica e artístico-cultural são: Oxidação de Hidrogênio, Redução de Oxigênio, Célula a Combustível, Eletrocatalise, Eletrocatalisadores Dispersos, Eletrodo de Hidreto Metálico, Bateria Níquel-Hidreto. É pesquisador 1A do CNPq.

Luiz Henrique Dall’Antonia (<http://lattes.cnpq.br/0622474265250573>)

Química (USP/1993), mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais (USP/1995), doutorado em Química (Físico-Química) USP/Université de Sherbrooke (Canadá, 1999). Atuou como pós-doutorando no Instituto de Química/USP e como Professor Visitante na University of Texas at Arlington (EUA, 2009). Atualmente é Professor Associado da Universidade Estadual de Londrina. Atua como orientador de alunos de Iniciação Científica, Mestrado e Doutorado. Tem experiência na área de Química, com ênfase em Eletroquímica e Ciências Ambientais,

principalmente nos seguintes temas: desenvolvimento de sensores e biossensores, membranas biocompatíveis, química de nanomateriais, desenvolvimento de materiais avançados para produção de energia e remediação ambiental. Foi Chefe do Departamento de Química da Universidade Estadual de Londrina entre 2010 e 2012 e atualmente é Coordenador do Programa de Pós-graduação em Química na mesma instituição. Participa como Tesoureiro da Secretaria Regional do Paraná na Sociedade Brasileira de Química e fez parte como Diretor da Divisão de Eletroquímica e Eletroanalítica da SBQ, bem como do Corpo Editorial da Química Nova (SBQ) entre 2008/2012. Atualmente é Bolsista Produtividade 2 do CNPq na área de Ciências Ambientais.

Fabio Henrique Barros de Lima (<http://lattes.cnpq.br/8978509213666235>)

Química (USP/2001) e doutorado em Físico-Química pelo Instituto de Química de São Carlos (IQSC-USP/2006), com estágio no Brookhaven National Laboratory. Pós-doutoramento (IQSC-USP/entre 2006 e 2008). Atualmente é professor doutor do Instituto de Química de São Carlos – USP. Publicou 45 artigos em periódicos especializados e mais de 70 resumos de trabalhos em anais de eventos. Participou e apresentou palestras em mais que 10 congressos no exterior e mais de 40 no Brasil. Suas principais áreas de atuação são relacionadas com a investigação da eletrocatalise das reações eletroquímicas de quebra da água, de eletro-oxidação de moléculas combustíveis orgânicas e inorgânicas, eletro-redução de oxigênio e eletro-redução de dióxido de carbono. Estas reações estão envolvidas em dispositivos eletroquímicos de conversão e armazenamento de energia, tais como células a combustível, eletrolisadores, e dispositivos eletroquímicos regenerativos.

REFERÊNCIAS

ABERNATHY, W. J.; CLARK, K. B. Innovation: mapping the winds of creative destruction. *Research Policy*. v. 14, n. 1, p. 3-22, 1985.

BORDEAUX REGO, A. C. Internet das Coisas. *Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil diante de Inovações Disruptivas*. Brasília: IEL, 2017.

BRESNAHAN, T.F., TRAJTENBERG, M. General purpose technologies: “engines of growth”? *Journal of Econometrics, Annals of Econometrics*, 65, pp. 83–108, 1996.

BREZNITZ, D.; MURPHREE, M. *Run of the red queen: government, innovation, globalization, and economic growth in China*. New Haven: Yale University Press, 2011.

CARROLL, L. *Alice: edição comentada e ilustrada: Aventuras de Alice no País das Maravilhas & Através do espelho*. Rio de Janeiro: Zahar, 2013.

CARVALHO, A. J. F. Materiais Avançados. *Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil diante de Inovações Disruptivas*. Brasília: IEL, 2017.

FREEMAN, C.; PEREZ, C. Structural crises of adjustment, business cycles and investment behavior. In: DOSI, G. et al. (Eds.) *Technical Change and Economic Theory*. London: Pinter, 1988.

GARCIA, R.; CALANTONE, R. A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: a literature review. *Journal of Product Innovation Management*, v. 19, n. 2, p. 110-132, 2002.

GEELS, F. W. *Understanding the dynamics of technological transitions: a co-evolutionary and socio-technical analysis*. PhD Thesis, Twente, Enschede, 2002.

JOVANOVIC, B.; ROUSSEAU, P. L. General purpose technologies. In: DURLAUF, S. N.; AGHION, P. (Eds.). *Handbook of economic growth*. London: Elsevier, 2005. V. 1.

KNIGHT, F. H. *Risk, uncertainty and profit*. New York: Augustus M Kelley, 1921.

LOURAL, C. D. A. Tecnologias de Redes. *Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil diante de Inovações Disruptivas*. Brasília: IEL, 2017.

MANKINS, J. *Technology readiness levels: a white paper*. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1995.

MOREIRA-FILHO, C.A.; ARRUDA, P. Biotecnologia e Bioprocessos. *Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil diante de Inovações Disruptivas*. Brasília: IEL, 2017.

NAVEIRO, R. M. Produção Inteligente e Conectada. *Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil diante de Inovações Disruptivas*. Brasília: IEL, 2017.

OLIVEIRA JR., O. N. Nanotecnologia. *Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil diante de Inovações Disruptivas*. Brasília: IEL, 2017.

PRADO, E. Inteligência Artificial. *Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil diante de Inovações Disruptivas*. Brasília: IEL, 2017.

SAGER, B. Scenarios on the future of biotechnology. *Technological Forecasting and Social Change*. v. 68, n. 2, p. 109-129, 2001.

SCHUMPETER, J. A. *Capitalism, Socialism, and Democracy*. New York: Harper and Row, 1950.

SCHUMPETER, J. *The theory of economic development*. New Brunswick: Transaction Publishers, 1983.

TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. *Managing innovation: Integrating technological, market and organizational change*. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

TORRESI, R. M. Armazenamento de Energia. *Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil diante de Inovações Disruptivas*. Brasília: IEL, 2017.

TUSHMAN, M. L.; ANDERSON, P. Technological discontinuities and organizational environments. *Administrative Science Quarterly*. v. 31, n. 3, p. 439-465, 1986.

IEL/NC

Paulo Afonso Ferreira
Diretor-Geral

Paulo Mól Júnior
Superintendente

Cynthia Pinheiro Cumaru Leodido
Renaide Cardoso Pimenta
Equipe Técnica

DIRETORIA DE INOVAÇÃO

Gianna Sagazio
Diretora de Inovação

Suely Lima Pereira
Gerente de Inovação

DIRETORIA DE COMUNICAÇÃO – DIRCOM

Carlos Alberto Barreiros
Diretor de Comunicação

Gerência Executiva de Publicidade e Propaganda – GEXPP

Carla Gonçalves
Gerente-Executiva de Publicidade e Propaganda

DIRETORIA DE SERVIÇOS CORPORATIVOS – DSC

Fernando Augusto Trivellato
Diretor de Serviços Corporativos

Área de Administração, Documentação e Informação – ADINF

Maurício Vasconcelos de Carvalho
Gerente-Executivo de Administração, Documentação e Informação

Alberto Nemoto Yamaguti
Normalização

Editorar Multimídia
Revisão e Diagramação

PROJETO INDÚSTRIA 2027

Antonio Carlos Bordeaux-Rego
Antonio José Felix de Carvalho
Carlos Alberto Moreira-Filho
Claudio de Almeida Loural
Eduardo Prado
Oswaldo Novais de Oliveira Jr.
Paulo Arruda
Ricardo M. Naveiro
Roberto Manuel Torresi
Autores

Luciano Coutinho
João Carlos Ferraz
David Kupfer
Mariano Laplane
Roberto Vermulm
Margarida Baptista
Luiz Antonio Elias
Caetano Penna
Fernanda Ultremare
Giovanna Gelfi
Mateus Labrunie
Carolina Dias
Thelma Teixeira
Execução Técnica

Execução Técnica:



Iniciativa:



Confederação Nacional da Indústria

CNI. A FORÇA DO BRASIL INDÚSTRIA

Realização:



*Iniciativa da CNI - Confederação
Nacional da Indústria*