

UM PANORAMA DE NOVAS TECNOLOGIAS E SEUS IMPACTOS NA INDÚSTRIA

Claudio de Almeida Loural
26/06/2014

Sumário

1	Introdução	2
2	Tendências gerais da indústria pela perspectiva tecnológica	3
2.1	Papel ubíquo da tecnologia de informação	5
2.2	Modelagem e simulação	6
2.3	Gestão da cadeia global de fornecimento	6
2.4	Capacidade de mudança dos sistemas de produção	7
2.5	Adoção da manufatura sustentável.....	7
2.6	Perspectivas: <i>cloud manufacturing</i> ?	8
3	Tecnologias habilitadoras.....	10
3.1	Conceito e panorama internacional.....	10
3.2	Plataformas	12
3.3	Identificação de tecnologias habilitadoras.....	12
4	Panorama de tecnologias selecionadas.....	18
4.1	Manufatura ou fabricação aditiva.....	18
4.1.1	Aspectos gerais.....	18
4.1.2	Panorama brasileiro.....	23
4.2	Materiais avançados	24
4.2.1	Tendências gerais.....	24
4.2.2	Áreas de aplicação.....	27
4.2.3	Panorama brasileiro.....	29
4.3	Nanotecnologia	31
4.3.1	Aspectos gerais.....	31
4.3.2	Panorama brasileiro.....	34
5	Discussão.....	38
6	Conclusão	42
	Bibliografia.....	44
	Siglas.....	46
	Apêndice 1 – <i>Technology Readiness Level</i>	47

1 Introdução

A capacidade de inovar e fazê-lo em ritmo acelerado é, talvez, o mais importante fator de sucesso de empresas e países no futuro (WEF, 2012). Desde o fim da II Guerra Mundial, a dimensão tecnológica tem sido o foco o foco de políticas públicas de vários países (GODIN, 2008) que têm por objetivo promover a capacitação industrial e sua capacidade de criar novos produtos e processos.

Ultimamente, outras dimensões da inovação ganharam bastante destaque. A própria OCDE, por exemplo, em 2005, na 3ª edição de seu documento-guia para coletar dados estatísticos sobre inovação, o Manual de Oslo, ampliou o conceito de inovação até então adotado para incluir também as inovações que ocorrem no domínio do marketing e das estruturas organizacionais (OECD, 2005).

Não obstante, analisando o caso de seu país, os Estados Unidos, Tassej ressaltou a importância do desenvolvimento tecnológico e da economia baseada na tecnologia (TASSEY, 2009)¹. Embora não seja possível comparar Brasil e Estados Unidos em termos de atualização e maturidade tecnológica, essa questão também é fundamental para uma estratégia brasileira de desenvolvimento econômico e social, como defende, por exemplo, Kupfer (KUPFER, 2010), especialmente para o setor industrial.

O objetivo do presente texto é apresentar um panorama das tendências tecnológicas em algumas áreas ou temas que tenham impacto direto nos diversos segmentos da indústria de manufatura. A partir desse panorama, são levantadas algumas questões para debate no âmbito do NEIT e eventual aprofundamento.

A abordagem adotada se baseia principalmente, mas não só, em trabalhos de órgãos de governo e de *think tanks* de países em que essa discussão já está em curso. Isso se justifica quando se considera que as tendências gerais do desenvolvimento tecnológico costumam ser delineadas pelo tipo e pela intensidade das atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nos países mais desenvolvidos economicamente. Numa economia cada vez mais global, essas tecnologias tendem a se difundir e ser absorvidas, copiadas ou aperfeiçoadas rapidamente pelos outros países.

O trabalho está estruturado da seguinte maneira: na seção 2 é feita uma apresentação dos principais fatores que afetam o futuro da indústria manufatureira sob a perspectiva da tecnologia, destacando-se o peso das tecnologias de informação e comunicação (TICs) concluindo com um esclarecimento sobre a noção de “manufatura avançada”. Essa noção serve como prólogo para a seção 3, onde se introduz o conceito de tecnologia habilitadora. Foram identificadas as tecnologias habilitadoras mais interessantes para a evolução da indústria manufatureira e algumas, mais representativas para o caso brasileiro, foram escolhidas para uma breve análise. Na seção 4, faz-se um panorama das tecnologias escolhidas, enquanto nas últimas seções são encaminhadas questões para discussão e aprofundamento.

¹ A referência em questão é um resumo em slides do livro do mesmo autor: Tassej, Gregory (2007) *The Technology Imperative*. Cheltenham, UK and Northampton, MA USA: Edward Elgar.

2 Tendências gerais da indústria pela perspectiva tecnológica

O relatório do Fórum Econômico Mundial que analisou forças e tendências para moldar o futuro da indústria manufatureira (WEF, 2012) destacou alguns fatores de mudança importantes, como a demografia, o comércio internacional, o crescimento da infraestrutura digital, a globalização das cadeias de suprimento, a demanda por energia e recursos naturais. Do ponto de vista tecnológico, pouco foi mencionado: basicamente apenas o aproveitamento da infraestrutura digital nos processos de manufatura, como por exemplo, a combinação da modelagem computacional em três dimensões (3D) com a manufatura por adição, ou aditiva.

Documentos políticos ou estratégicos, como a ‘Estratégia para a Manufatura Avançada’ do governo norte-americano (NSTC, 2012), também citam algumas tecnologias, mas como o escopo do documento é de alta política, pouco se discute sobre as tecnologias mais importantes propriamente ditas.

Recorrente em muitos trabalhos, a expressão “manufatura avançada” tem uma definição um tanto fluida. O documento do Governo norte-americano citado acima (NSTC, 2012) define manufatura avançada como

“... uma família de atividades que (a) dependem do uso e coordenação de automação, informação, computação, software, sensores e redes, e / ou (b) façam uso de materiais de ponta e capacidades emergentes habilitadas pelas ciências físicas e biológicas, por exemplo a nanotecnologia, química e biologia. Trata-se de duas maneiras novas para a fabricação de produtos já existentes, bem como para a fabricação de novos produtos surgindo de tecnologias novas e avançadas”.

A visão europeia se aproxima do conceito exposto. O relatório de um grupo de trabalho especial da Comissão Europeia² define **sistemas de manufatura avançada** como sistemas que utilizam técnicas inovativas na fabricação e criam novos processos e tecnologias de manufatura (HLEG-KETS, 2010).

No dizer do documento citado, os sistemas de manufatura avançada (em inglês, AMS) melhoram a precisão das operações e aumentam a sua velocidade ao mesmo tempo em que reduzem o consumo de materiais, os custos, o desperdício e a poluição dos processos fabris. Integram-se com tecnologias como as TICs, caracterizando-se por alto nível de automação, personalização, escalabilidade e uso de modelagem computacional de produtos e processos. Os AMS são intensivos em capital, conhecimento e habilidades.

O documento admite ainda uma segunda vertente para o conceito de “manufatura avançada”: a fabricação de produtos de alta tecnologia.

Essa dupla “interpretação” do termo, que ocorre tanto na Europa quanto nos EUA (LIND & FREEDMAN, 2012) reflete os dois lados da inovação tecnológica: a inovação de produto e a inovação de processo.

² Ver o sítio web correspondente:

http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/key_technologies/kets_high_level_group_en.htm

Outro conceito próximo à de manufatura avançada é o de “manufatura inteligente” (*smart manufacturing*) (SMLC, 2011), caracterizada pelo uso intensivo de tecnologias digitais para permitir a rápida fabricação de novos produtos, a rápida resposta à demanda e a otimização em tempo real da produção e das cadeias de fornecimento. O conceito é representado pictoricamente na Figura 1.

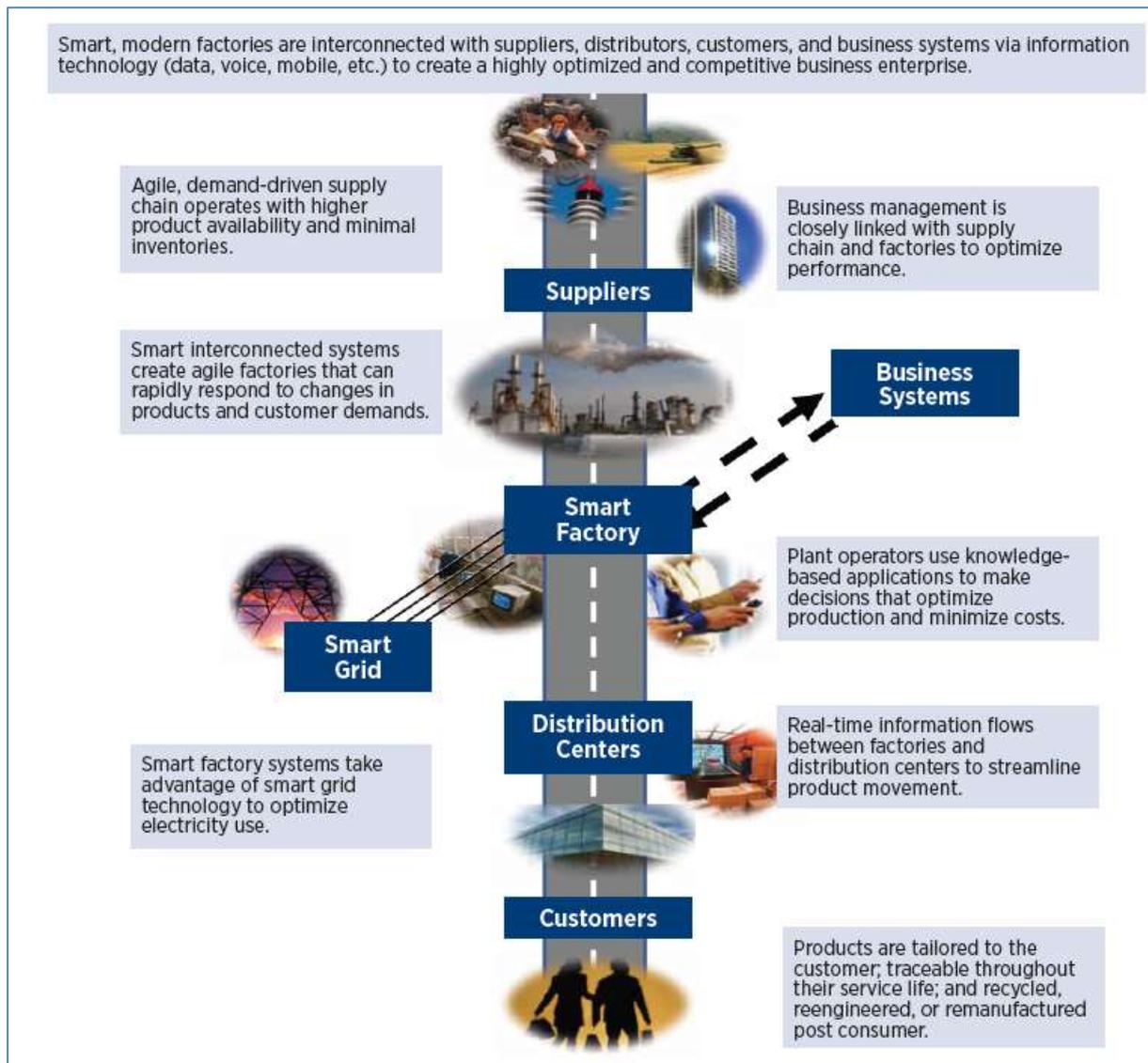


Figura 1 - Conceito da empresa de manufatura avançada (SMLC, 2011)

Como entender melhor uma noção tão abrangente e identificar quais as tendências gerais que a indústria manufatureira tem pela frente?

Um trabalho prospectivo recente e muito interessante foi produzido pelo *Institute for Defense Analyses* para o Departamento de Defesa dos EUA (IDA, 2012). O documento faz uma discussão da manufatura avançada sob a ótica da tecnologia, partindo de uma análise sobre tendências gerais da indústria nessa perspectiva. Baseado em entrevistas com quase uma centena de especialistas norte-americanos da academia, indústria e Governo, o relatório mencionado identificou cinco grandes tendências aplicáveis aos vários setores da indústria manufatureira (IDA, 2012):

- (a) O papel ubíquo da tecnologia da informação (TI)³.
- (b) O uso crescente da modelagem e da simulação computacional na manufatura.
- (c) A complexa gestão das cadeias globais de fornecimento.
- (d) A capacidade de mudança dos sistemas de produção.
- (e) A adoção da manufatura sustentável.

Outro relatório recente, de um organismo internacional, a UNIDO, também lista alguns fatores que afetam positivamente a competitividade da indústria manufatureira (UNIDO, 2013):

- a manufatura distribuída;
- a manufatura de resposta rápida⁴;
- a manufatura complexa; a manufatura personalizada;
- a manufatura centrada no ser humano;
- a manufatura sustentável, e
- a manufatura receptiva à inovação.

Os rótulos podem ser um pouco diferentes, mas as ideias embutidas nos conceitos são bastante similares às daquelas das cinco grandes tendências apontadas pelo relatório norte-americano. Cada uma delas merece uma exposição mais esclarecedora.

2.1 Papel ubíquo da tecnologia de informação

A tecnologia da informação (mais apropriadamente, as tecnologias de informação e comunicação, TICs) está definitivamente incorporada à indústria manufatureira, uma visão que o documento do *think tank* norte-americano compartilha com o documento do Fórum Econômico Mundial (WEF, 2012). As TICs são essenciais aos sistemas de automação e controle das máquinas e equipamentos, aos instrumentos de sensoriamento e medição, aos sistemas de projeto, aos sistemas de gerenciamento de energia, aos sistemas de informação gerencial da produção e da empresa industrial como um todo.

A incorporação da tecnologia digital ao universo da manufatura proporciona ganhos na qualidade dos produtos finais e na produtividade da fábrica. Porém, o uso crescente das TICs também fora do “chão de fábrica” impacta tanto a configuração das cadeias de suprimento, reduzindo restrições puramente geográficas, como também o modelo do ciclo de vida dos produtos – da concepção ao uso, incluindo suporte e manutenção, até o descarte final. Sistemas informatizados de gestão do ciclo de vida de produtos (*Product Lifecycle Management*, ou PLM) fazem parte do portfólio de grandes fornecedores de sistemas de software como IBM, SAP, Oracle, Siemens assim como de fornecedores de menor porte.

³ Ou também, Tecnologias de informação e comunicação (TICs).

⁴ *Rapidly responsive manufacturing*.

2.2 Modelagem e simulação

Ligada à difusão das tecnologias digitais está tendência crescente do uso de modelagem e simulação computacionais nas várias fases do ciclo de vida dos produtos, nos processos de fabricação, na produção e na cadeia de suprimentos.

Ao contrário do uso das TICs no contexto da automação, o objetivo maior da modelagem e simulação não é tanto a eficiência industrial. Nesse caso o objetivo é ir mais rapidamente das etapas de planejamento e concepção até a produção. Sozinha, a modelagem computacional permite explorar situações desconhecidas. Integrando-se modelagem e simulação a programas de computador ou sistemas científicos e de engenharia é possível resolver questões técnico-científicas devidamente formuladas e fazer escolhas de projeto quando existem diferentes alternativas (KADANOFF, 2004).

Modelagem e simulação podem evitar experimentos materiais custosos, além de abreviar o tempo de desenvolvimento de um produto, do projeto de uma fábrica ou de uma estratégia de suprimento. Ao permitir a incorporação de aspectos de produção ou suprimento desde as fases iniciais de um projeto de desenvolvimento, o risco geral do empreendimento diminui. A probabilidade de retrabalho do projeto é menor e a probabilidade de sucesso no *start up* da produção é maior, fazendo aumentar o desempenho e a competitividade da empresa. Não seria errado dizer que modelagem e simulação podem ser consideradas como outro patamar de informatização da indústria, além do CAD/CAM⁵ tradicional.

2.3 Gestão da cadeia global de fornecimento

As cadeias de fornecimento hoje em dia são globais, um fenômeno também favorecido pela redução dos custos de comunicação e pelo processo de globalização. A gestão dessas cadeias depende também das TICs – por exemplo, dos sistemas de informações gerenciais e do rastreamento logístico via etiquetas RFID⁶.

O serviço de transporte de cargas tornou-se um serviço de logística e passou a requerer muita integração entre a empresa de logística, os fornecedores e as fábricas usuárias das matérias-primas e componentes. Essa articulação pode tornar a operação de suprimento até mais crítica do que a fabricação do item propriamente dito: enquanto a produção de um bem pode ser rápida, automatizada e de alta qualidade, os suprimentos seguem cadeias complexas, globais e podem tomar um tempo longo para chegar à fábrica de destino. Pode-se imaginar a combinação das tendências (a) e (b) mencionadas acima (p.5) em novas operações logísticas automatizadas (com o uso de tecnologia robótica) e otimizadas (com o uso de modelagem e simulação), adicionando uma importância à cadeia de valor da empresa que anteriormente não existia ou, pelo menos, não era tão significativo.

⁵ *Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing.*

⁶ *Radio Frequency Identification*

2.4 Capacidade de mudança dos sistemas de produção

Sistemas de produção capazes de mudar o produto da fabricação ou se adaptar a outros tipos de mudança não são novos e constituem os chamados ‘sistemas flexíveis de manufatura’, em inglês, FMS⁷. O termo “capacidade de mudança” (em inglês, *changeability*) empregado por (IDA, 2012) é um guarda-chuva que abarca os vários níveis de mudança na capacidade fabril, desde os níveis mais altos, como a mudança do produto fabricado numa planta inteira, até os níveis mais baixos, como uma máquina ou estação de trabalho que muda o componente a ser produzido com mínima inconveniência e demora (WIENDAHL, et al., 2007)⁸.

Segundo (MEHRABI, et al., 2000) os sistemas flexíveis compreendem um hardware fixo e um software fixo, porém programável, para lidar com mudanças nos pedidos, na programação da produção e no ferramental para diversos tipos de partes. Um nível mais básico seria o dos sistemas reconfiguráveis, isto é, que incorporam módulos de hardware e de software que podem ser facilmente rearranjados ou substituídos permitindo adicionar, remover ou modificar capacidades de fabricação em resposta a demandas externas.

Noutro extremo, por meio de sistemas e máquinas reconfiguráveis, a “capacidade de mudança” poderia chegar até a situação de se alterar uma característica particular de um determinado produto com muito pequena ou nenhuma perturbação na linha fabril.

A infraestrutura digital e a modelagem e simulação combinadas a sistemas com grande capacidade de mudança podem impactar as decisões empresariais de distribuição geográfica da produção bem como facilitar o trabalho dos engenheiros de produto, uma vez que certas questões de custo e desempenho devidas a restrições de maquinário tenderiam a desaparecer.

2.5 Adoção da manufatura sustentável

A última tendência apontada em (IDA, 2012) é o conceito de fabricação ou manufatura sustentável, entendida como “os processos industriais não poluentes, que conservam energia e recursos naturais e que são seguros e econômicos para os empregados, consumidores e para a comunidade”.

É um conceito abrangente, cuja aceitação é motivada por diversos fatores: os custos crescentes de energia e de matérias-primas e, provavelmente no futuro, de água; razões de imagem empresarial e marketing; questões ligadas a eventuais quebras das cadeias de fornecimento e escassez de certas matérias-primas como, é o caso das terras-raras, estratégicas para a indústria eletrônica e de energia (WEF , 2012).

⁷ *Flexible Manufacturing Systems*

⁸ Citada por (IDA, 2012).

2.6 Perspectivas: *cloud manufacturing*?

As TICs mudaram bastante o ambiente da manufatura. Uma consequência importante da incorporação das tecnologias digitais ao contexto da manufatura é a assimilação de alguns padrões característicos do setor de TICs por parte da indústria, entre outros:

- o maior peso da modelagem e simulação no lugar da experimentação física;
- o surgimento de uma visão sistêmica da produção, em contraponto a uma visão sequencial rígida;
- a flexibilização e customização dos processos fabris;
- a menor importância da concentração geográfica, especialmente, dos vínculos entre projeto e fabricação;
- a reconfiguração das cadeias de suprimento ou da distribuição global dos fornecedores.

Uma questão ainda pouco explorada mas com potencial para aprofundar impactos como os acima descritos é a influência do paradigma de *cloud computing*⁹ no ambiente da manufatura avançada, conduzindo ao que poderia ser chamado de “*cloud manufacturing*” (XU, 2012) ou “**manufatura em nuvem**”.

Segundo essa referência, a **manufatura em nuvem** pode ser definida como¹⁰

“um modelo para habilitar o acesso via rede ubíquo, conveniente, sob demanda a um conjunto de recursos de manufatura configuráveis (ferramentas de software, equipamentos, etc) que podem ser rapidamente provisionados e fornecidos com mínimo esforço gerencial ou interação com o provedor de serviço”.

Esse conceito leva a noção de recursos distribuídos ao extremo, dissociando não apenas etapas dentro de uma cadeia (como a separação entre projeto e a produção), mas construindo uma estrutura em camadas, que é característica das TICs, para o próprio ambiente da indústria manufatureira. As diversas etapas do ciclo de vida de um produto, como projeto, fabricação, testes, gestão, poderiam ser agora tratadas como serviços disponíveis na “nuvem”. Nessa situação, clientes poderiam contratar a esses serviços de acordo com seus requisitos – a empresa poderia, em princípio, ser não apenas *fabless*, isto é, não dispor de planta fabril, mas também dispensar infraestrutura computacional própria, podendo alugar ou contratar apenas serviços para gerar um produto final. Em tal cenário, a manufatura orientada à produção daria lugar à manufatura orientada a serviço (XU, 2012) e acabaria por assumir ainda mais fortemente características derivadas do setor de TICs.

⁹ *Cloud computing* ou computação em nuvem é um paradigma de computação baseado na Internet, no qual recursos computacionais, software e informações são compartilhados e fornecidos sob demanda a computadores e outros dispositivos.

¹⁰ A referência define *cloud manufacturing* em analogia à definição de *cloud computing* do NIST – National Institute of Standards and Technology.

O conceito acima não é uma proposta apenas: a literatura já relata vários trabalhos de pesquisa em diferentes aspectos necessários a um ambiente futuro de manufatura em nuvem (XU, 2012).

3 Tecnologias habilitadoras

3.1 Conceito e panorama internacional

Das cinco grandes tendências da indústria descritas na seção 2, pode-se dizer que as quatro primeiras refletem, direta ou indiretamente, a penetração maciça das tecnologias de informação e comunicação (TICs) no ambiente da empresa manufatureira e das próprias operações fabris. É razoável afirmar que se trata de um prolongamento do processo de automação industrial, levado agora a explorar as várias possibilidades abertas pelo uso das TICs, a propósito, identificada ela mesma como a primeira grande tendência geral (IDA, 2012).

E quanto a outras tecnologias? A literatura cita frequentemente “tecnologias habilitadoras” (*enabling technologies*), isto é, tecnologias que permitem a geração de novos produtos e processos e até mesmo a derivação de outras tecnologias.

Vale comentar que uma conceituação precisa e satisfatória de tecnologia habilitadora não é fácil de ser encontrada. Num documento do Governo Australiano, por exemplo, lê-se que

“uma tecnologia habilitadora é uma tecnologia que pode conduzir a mudança radical na capacidade de um usuário ou cultura, permitindo a criação de produtos radicalmente novos ou serviços ou processos mais eficientes” (DIISRTE, 2012),

uma definição que enfatiza mais o impacto do que propriamente a característica das tecnologias habilitadoras.

Para a Comissão Europeia, as “tecnologias habilitadoras chave” (abreviadamente, KETs, do inglês *Key Enabling Technologies*) são caracterizadas como tecnologias intensivas em conhecimento e associadas a uma elevada intensidade de P&D, rápidos ciclos de inovação, intensivas tanto em capital quanto em emprego altamente qualificado (EC, 2009).

Não obstante a falta de uma definição rigorosamente consensada, cumpre reconhecer a importância estratégica de algumas tecnologias cujos *outputs* – produtos e processos – são capazes de viabilizar o surgimento de novos setores econômicos ou atualizar e revitalizar setores tradicionais.

Nesse particular aspecto, o relatório do Fórum Econômico Mundial (WEF, 2012) é pobre: apenas a digitalização foi colocada em relevância, tanto sob a perspectiva da automação das fábricas, quanto da emergência de novas tecnologias que aproveitam a infraestrutura digital, como, por exemplo, a combinação da modelagem computacional em três dimensões (3D) com a manufatura por adição, ou aditiva.

Outros documentos internacionais são mais específicos. Um estudo de *foresight* do Governo do Reino Unido (GO-SCIENCE, 2010) aponta algumas tendências importantes para o futuro (2020) da indústria global e britânica em particular, como por exemplo, a

fabricação sob demanda¹¹, a transição para uma matriz energética renovável, o uso de novos materiais, a infraestrutura inteligente¹² e a medicina regenerativa baseada em células-tronco. O relatório é acompanhado de um anexo que detalha mais de 50 tecnologias reunidas em quatro grandes grupos: materiais e nanotecnologia, energia e tecnologias de baixo carbono, biotecnologia e farmacêutica, tecnologias digitais e redes.

A Comissão Europeia tem promovido estudos semelhantes buscando identificar quais seriam as principais tecnologias habilitadoras ou tecnologias-chave (abreviadamente, KETs, do inglês *Key Enabling Technologies*) para a economia europeia no horizonte de 2020. As KETs são definidas como tecnologias intensivas em conhecimento e associadas a uma elevada intensidade de P&D, rápidos ciclos de inovação, intensivas tanto em capital quanto em emprego altamente qualificado (EC, 2009). Pelo seu impacto na economia europeia e global, as KETs selecionadas foram materiais avançados, nanotecnologia, micro e nanoeletrônica, biotecnologia industrial e fotônica foram identificadas como prioritárias para a competitividade europeia. Permeando essas áreas encontram-se os sistemas avançados de manufatura, que proporcionam melhorias nas propriedades dos produtos, velocidade de produção, custo, consumo de energia e de materiais, precisão na operação, gestão de resíduos e de poluição (EC, 2009).

O trabalho do *think tank* norte-americano IDA, citado na seção 2 (IDA, 2012), selecionou quatro áreas tecnológicas como representativas do cenário de mudanças na manufatura, com uma perspectiva voltada para os próximos 20 anos: semicondutores, materiais avançados e engenharia de materiais computacional, fabricação aditiva e biomanufatura com foco em biologia sintética.

A Austrália tem programa denominado *National Enabling Technologies Strategy* cujo foco não é apenas a questão industrial, mas abrange também outras dimensões do interesse nacional como agricultura, saúde, energia e meio ambiente (DIISRTE, 2012). Nesse contexto, são três as tecnologias destacadas: nanotecnologia, biotecnologia e biologia sintética.

O citado relatório da UNIDO (UNIDO, 2013) também destaca tecnologias habilitadoras com potencial impactante sobre a indústria manufatureira: fotônica, biotecnologia, nanotecnologia, manufatura aditiva, microtecnologia, TICs em sistemas de manufatura, materiais avançados e tecnologias ambientais e energia.

Uma nota: cabe mencionar que em seu plano de ação para ciência, tecnologia e inovação (MCTI, 2012), o governo brasileiro elencou tecnologias prioritárias, mas sua abordagem foi mais setorial do que habilitadora. Assim, acabou misturando setores verticais com tecnologias horizontais o que torna difícil comparar as escolhas brasileiras com as de outros países. Não obstante, há áreas coincidentes como nanotecnologia, biotecnologia e tecnologias de informação e comunicação.

¹¹ O relatório define a fabricação sob demanda como “a capacidade de fabricar um produto personalizado em locais diferentes, utilizando dispositivos de fabricação alta tecnologia guiado por um projeto com instruções codificadas em software” (*op. cit.*, p.2).

¹² Combinação de redes elétricas “inteligentes” (*smart grids*), redes de sensores, microgeração de energia e tecnologias associadas.

3.2 Plataformas

É interessante estender um pouco mais a discussão sobre o papel das tecnologias habilitadoras como “plataformas”, isto é, como tecnologias sobre as quais outras tecnologias, processos e produtos podem ser desenvolvidos.

A noção de “plataformas de produtos” é bastante conhecida. Robertson e Ulrich, por exemplo definem plataforma como a coleção de ativos compartilhados por um conjunto de produtos: componentes, equipamentos, processos e cadeia de suprimentos, conhecimento e know-how, bem como pessoas e relacionamentos (ROBERTSON & ULRICH, 1998).

Citando McGrath (McGRATH, 1995), van Vuuren e Halman definem a plataforma de produtos como sendo

“um conjunto de subsistemas e interfaces que formam uma estrutura comum da qual uma corrente de produtos relacionados pode ser eficientemente desenvolvida e produzida” (van VUUREN & HALMAN, 2001).

Ao estender o conceito a tecnologias propriamente ditas, o relatório da IDA (IDA, 2012), chegou a uma definição redundante de “tecnologia plataforma” (*platform technology*):

“uma tecnologia habilitadora que combina equipamentos, métodos e outras tecnologias e que tem o potencial de gerar saltos em desempenho e capacidade dos usuários”,

Assim, tendo em mente a equivalência prática entre as noções de tecnologias habilitadoras e tecnologias de plataforma, é possível traçar um paralelo com Robertson e Ulrich e afirmar que, venham a decorrer transformações significativas a partir das tecnologias assim classificadas:

- na concepção de produtos, nas ferramentas de projeto, e nos equipamentos de produção;
- no *know how* de projeto, engenharia e produção dos novos produtos bem como na cadeia de suprimento dos novos insumos pertinentes;
- nas bases de conhecimento e nas habilidades necessárias, em vários níveis, para lidar com tais tecnologias.

Esses impactos é que são importantes para avaliar como cada tecnologia específica vai afetar o futuro da manufatura.

3.3 Identificação de tecnologias habilitadoras

Cada um dos documentos citados nesta seção utilizou premissas e critérios distintos para selecionar as tecnologias ou grupos de tecnologia que pretendiam colocar em evidência em seus estudos prospectivos. O nível de explicitação desses critérios, sua descrição e justificativa não são homogêneos até mesmo porque partiram de demandas específicas diferentes. O horizonte de prospecção também não é sempre claro, embora a própria evolução tecnológica torne muito arriscado qualquer estudo com horizonte superior a 10 ou 20 anos.

Nesse sentido, o documento norte-americano é bastante ilustrativo e o mais explícito (IDA, 2012). Os critérios de seleção adotados foram cinco:

- a tecnologia segue ou se enquadra nas grandes tendências gerais de evolução da indústria;
- a tecnologia tem potencial para servir como plataforma, isto é, como uma tecnologia habilitadora;
- a tecnologia é crítica para a segurança nacional dos EUA;
- o papel de fatores habilitadores externos, tais como direitos de propriedade intelectual, regulação, intervenção governamental, qualidade da educação;
- o nível de investimento global de P&D.

Os critérios têm o viés do *sponsor* do estudo, o Departamento de Defesa dos EUA. Porém os dois primeiros, enquadramento nas tendências gerais e potencial de servir como plataforma ou tecnologia habilitadora, são bastante genéricos e, portanto, os mais aplicáveis em outros contextos e países.

Comparando-se diferentes referências internacionais, é possível montar a Tabela 1.

Tabela 1 - Tecnologias-chave segundo estudos selecionados

EUA (IDA, 2012)	Comissão Europeia (HLEG-KETS, 2011)	Reino Unido (GO-SCIENCE, 2010)	Austrália (DIIRTE, 2012)	UNIDO (UNIDO, 2013)
Materiais avançados	Materiais avançados Nanotecnologia	Materiais e nanotecnologia Energia e tecnologias de baixo carbono	Nanotecnologia	Materiais avançados Nanotecnologia Tecnologias ambientais e energia
Fabricação aditiva				Manufatura aditiva
Semicondutores	Micro e nanoeletrônica	Biotecnologia e farmácia	Biologia sintética	Microtecnologia
Biofabricação	Biotecnologia industrial Fotônica Sistemas de manufatura avançada	Tecnologias digitais e redes	Biotecnologia	Biotecnologia Fotônica TICs em sistemas de manufatura,

Sobre essa tabela cabem alguns comentários:

- a) Há uma grande coincidência entre as tecnologias selecionadas. Pode ocorrer que uma área compreendida numa categoria mais geral num estudo seja explicitada em outro. É o caso da biologia sintética no documento australiano e da manufatura 3D que é destacada no estudo norte-americano.

- b) Apenas os britânicos dão destaque explícito a tecnologias diretamente relacionadas à energia. Isto se deve ao caráter mais geral do estudo prospectivo do Reino Unido, que não é restrito apenas à manufatura em si, mas avalia diversos impactos econômicos de um modo geral.
- c) Apenas os norte-americanos dão destaque a semicondutores. Talvez seja uma manifestação de um viés ligado às preocupações do Departamento de Defesa. Por outro lado, a nanotecnologia com certeza tem impactos no segmento de componentes eletrônicos e na própria fotônica, conforme apontado no estudo da Comissão Europeia.
- d) A fotônica, por sua vez, é compreendida na grande categoria de tecnologias digitais e redes dos britânicos.
- e) Tecnologias derivadas das Ciências Biológicas aparecem nos diversos estudos. Talvez seja a família ou grupo de maior impacto para tanto para a economia como um todo quanto para áreas de interesse público e social mais amplo, como saúde e meio ambiente.
- f) O estudo da UNIDO parece ter consultado as mesmas fontes primárias (ou as principais) que o presente texto. Como costuma ocorrer frequentemente em casos assim, existe uma tendência a tomar três ou quatro referências como base, de modo que algumas perspectivas ou visões acabam se impondo.

Em resumo, os agrupamentos diferentes refletem também uma forte interdependência entre as tecnologias: fabricação aditiva, TICs e materiais; nanoeletrônica e tecnologias digitais; biotecnologia e nanotecnologia; materiais e nanotecnologia, e assim por diante.

Vale notar que, embora áreas como as de nanotecnologia e biotecnologia comportem produtos diretamente derivados, existe toda uma base de processos característicos dessas tecnologias que pode ser aplicado horizontalmente em diferentes setores. Em outras palavras, tais tecnologias ou famílias de tecnologias poderiam ser classificadas também como tecnologias de processos. Tassei (TASSEY, 2004) denomina essas tecnologias de “tecnologias genéricas”, isto é, uma base de conhecimentos a partir da qual conjuntos particulares de aplicações e outras tecnologias podem ser desenvolvidas¹³. Neste sentido, o conceito é próximo do conceito de paradigma tecnológico de Dosi, conforme o mesmo autor (TASSEY, 2008). E também, como se pode observar, praticamente equivalente à noção de plataforma (tecnologia plataforma, plataforma tecnológica) ou de tecnologia habilitadora que foram discutidas nas seções 3.1 e 3.2.

Observando-se mais uma vez a Tabela 1, vale se deter um pouco mais sobre as tecnologias identificadas:

- a) **Semicondutores.** É um fato bem conhecido que o Brasil busca há mais de 30 anos construir, sem sucesso, uma capacidade fabril competitiva em microeletrônica¹⁴.

¹³ A ideia do autor é que tecnologias genéricas são arriscadas, o setor privado não investe nelas o suficiente e, portanto, o apoio governamental é justificado e absolutamente necessário.

¹⁴ Nos EUA, é comum designar o setor de microeletrônica pelo nome do seu principal material de insumo, os semicondutores. Porém, materiais semicondutores também têm aplicações em fotônica ou em sensores

Apesar de sua inegável importância estratégica, o Brasil tende a ser muito mais um usuário dessa tecnologia do que um ator ativo. Porém, o domínio de certos processos elementares de microeletrônica é necessário para desenvolver aplicações em outros subsetores, como a micro e nanotecnologia.

- b) **Fotônica.** Tecnologias que tratam da emissão, detecção e processamento da radiação luminosa (desde o espectro infravermelho até o ultravioleta) e sua aplicação prática em campos da instrumentação, telecomunicações, manufatura, medicina, segurança e defesa, entre outros. É muito ligada às tecnologias de materiais, cujas propriedades ópticas e elétricas são fundamentais para o desenvolvimento de componentes.
- c) **Tecnologias de energia.** A sua importância econômica e estratégica é inegável. Contudo, no contexto industrial, ela é menos importante do que as demais tecnologias habilitadoras (ou genéricas ou plataformas) identificadas. Talvez caiba, oportunamente, uma análise vertical sobre as tecnologias necessárias para a produção de equipamentos destinados à geração e armazenamento de tecnologias alternativas e a questões de captura de carbono. Uma análise sobre materiais, entretanto, não poderá se furtar à análise de questões pertinentes ao segmento de energia.
- d) **Manufatura avançada.** A expressão é usada aqui num sentido próximo àquele que foi usado no início do texto. Pelo menos duas tecnologias mereceram destaque e foram tratadas separadamente por alguns estudos referenciados na Tabela 1: as **tecnologias digitais ou tecnologias da informação e comunicação (TICs)**, aplicadas às várias etapas dos processos industriais e do ciclo de vida dos produtos; e a **fabricação aditiva**. Uma apreciação do impacto da tecnologia digital foi apresentada na seção 2.1. Quanto à tecnologia aditiva, ela merece uma análise mais aprofundada.
- e) **Nanotecnologia.** Tecnologia com forte apelo midiático e considerada estratégica, a nanotecnologia tem sido alvo de grandes investimentos nos últimos anos¹⁵. Sob esse rótulo estão compreendidas as tecnologias que lidam com a matéria em níveis moleculares, cujas dimensões são da ordem de 1 a 100 nanômetros (1 nanômetro = 1 bilionésimo de metro, 10^{-9} m). Compreende o estudo e a manipulação da estrutura e das propriedades de materiais e dispositivos físicos, químicos e biológicos nessa escala de tamanho. Já tem um impacto perceptível na indústria e deverá ter mais ainda no futuro próximo.
- f) **Biotecnologia.** É um rótulo abrangente: trata-se da aplicação de organismos, sistemas e processos biológicos a vários segmentos industriais. Assim como a

biológicos. As tecnologias associadas à micro e nano fabricação são, em grande parte, derivadas das tecnologias de fabricação utilizadas em semicondutores.

¹⁵ Num relatório de 2001, a empresa de consultoria Cientifica Ltd. estimou em mais de US\$ 67 bilhões o total investido por governos na área de nanotecnologia. O investimento privado foi muito maior e o total, público e privado, deve chegar à casa do meio trilhão de dólares por volta de 2015. Ver notícia em <http://nanotechweb.org/cws/article/indepth/46555>

nanotecnologia também tem forte apelo na mídia, principalmente por causa de grandes projetos científicos básicos, como a mapeamento do genoma humano, e das aplicações imediatas na agroindústria (emprego de espécies geneticamente modificadas) e biomédicas (fármacos, terapias genéticas, células-tronco). É certamente uma área de grande impacto econômico e estratégico.

- g) **Materiais avançados.** Os materiais são fundamentais para a indústria. A capacidade de analisar a sua estrutura e aproveitar suas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e óticas tem sido fundamental para o desenvolvimento industrial nos últimos 50 anos. Avanços recentes em simulação computacional, especialmente no nível atômico e molecular têm contribuído muito para o desenvolvimento da tecnologia de materiais.

Essas tecnologias não isoladas. Com a provável exceção das TICs, cujo papel ubíquo já foi ressaltado anteriormente, o progresso da grande maioria das tecnologias relacionadas na Tabela 1 influencia ou é influenciado pelo avanço de alguma outra tecnologia presente na tabela, como ilustrado na Figura 2.

Duas tecnologias, em particular, forma representadas como interseção de outras duas: a **fotônica**, como interseção da tecnologia de materiais com a micro/nanotecnologia; e a **manufatura aditiva**, como interseção das TICs com a tecnologia de materiais.

A razão para essa representação ou classificação é mais de intensidade da relação de interdependência do que propriamente da natureza em si dessas tecnologias. No caso da fotônica, a maioria dos componentes ópticos e dos efeitos que se utilizam nas aplicações práticas depende das propriedades dos materiais. Ou seja, é frequente a situação em que o material ou propriedade precede a necessidade de aplicação. É um campo em que o *technology push* ainda predomina. Além disso, cada vez mais, técnicas de micro e nanofabricação são utilizadas para produzir ou processar esses materiais.

No caso da manufatura aditiva, todo o processo que vai da concepção do produto até as instruções para deposição do material dependem do avanço das TICs. Por sua vez, o progresso na tecnologia de síntese e processamento de materiais é crucial para a “materialização” dos projetos digitais.

Ainda quanto à Figura 2, um leitor poderá argumentar que as TICs dependem do desenvolvimento de semicondutores (microeletrônica), mas esta relação não está mostrada. De fato, os semicondutores estão na base das tecnologias digitais. Contudo, o avanço tecnológico das últimas décadas foi tão grande que muitas tecnologias digitais foram derivadas e têm sua trajetória evolutiva desacoplada do desenvolvimento da tecnologia de semicondutores. Tecnologias intensivas em software, executando programas em plataformas genéricas de hardware, abriram possibilidades que prescindem da próxima geração de tecnologia do silício para desdobrar suas aplicações. Um novo desenvolvimento tecnológico em circuitos integrados certamente repercutirá em parâmetros de desempenho. Em algumas situações, esse novo desempenho permitirá que surjam novas aplicações até então desconhecidas. Porém, na maioria das vezes, o impacto das TICs será eminentemente sistêmico, como é o caso do que acontece na manufatura avançada e foi ilustrado na Figura 1.

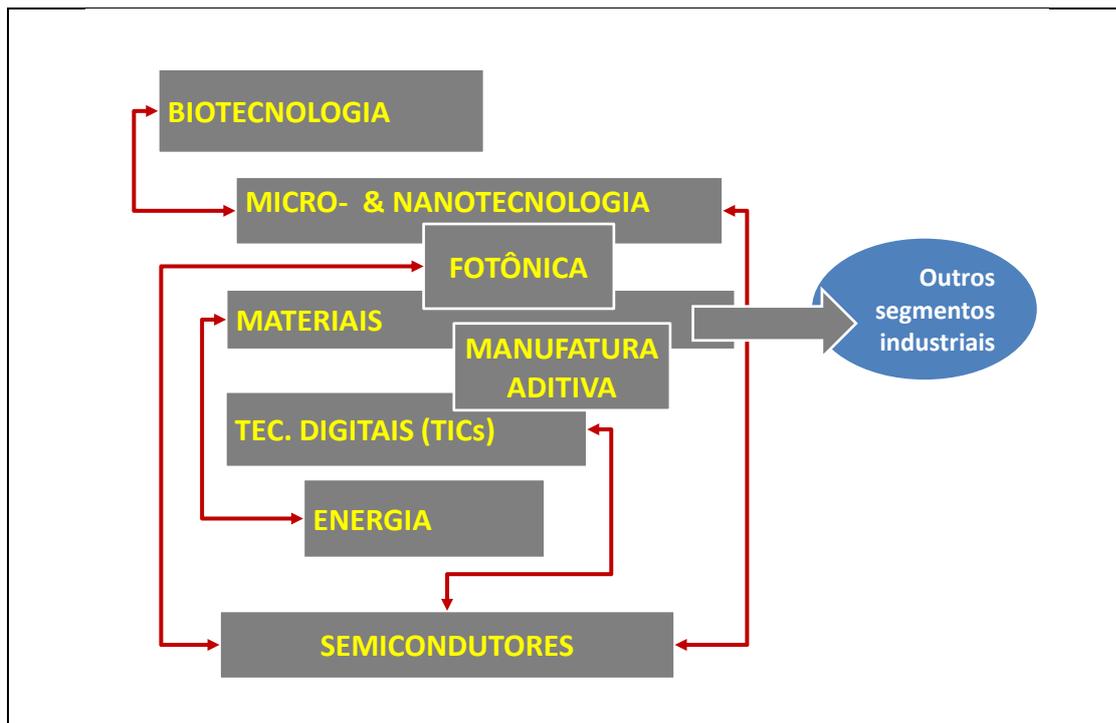


Figura 2 - Relação entre as tecnologias habilitadoras

No próximo capítulo serão analisadas em mais detalhes três dessas tecnologias: a fabricação aditiva, materiais avançados, e nanotecnologia, essa última em menos profundidade que as duas anteriores. Sobre as TICs ou tecnologias digitais, a discussão inicial da seção 2, relativa à emergência da noção de “nova manufatura”, especialmente as subseções 2.1 a 2.4, é suficiente para o escopo do presente relatório.

Ressalve-se que a seleção é motivada mais pela familiaridade do autor com as tecnologias destacadas do que por outra razão objetiva, resultado de um trabalho analítico.

A rigor, para a discussão do impacto de cada uma das tecnologias no contexto brasileiro, (ou qualquer outro recorte) seria recomendável um estudo prospectivo sistemático, utilizando ferramentas como Delphi ou painéis de especialistas familiarizados com as áreas tecnológicas e com a realidade do país. Porém, isso vai além do escopo desse trabalho.

4 Panorama de tecnologias selecionadas

4.1 Manufatura ou fabricação aditiva

4.1.1 Aspectos gerais

Nos processos de fabricação tradicional, pode-se dar forma a um objeto sólido basicamente de duas maneiras: pela subtração de matéria de um bloco sólido inicial (como na usinagem num torno), ou pela aplicação de alguma forma de pressão (como na fundição). Como o nome indica, a primeira classe de processos é o que se chama de “fabricação subtrativa”. Na fabricação aditiva ocorre o oposto: as peças são fabricadas pela adição de material até se atingir a forma desejada. As máquinas popularmente conhecidas como “impressoras tridimensionais” ou “impressoras 3D” operam com processos aditivos de fabricação.

Existem vários processos de fabricação aditiva, mas todos eles têm em comum uma construção camada por camada (o que os torna bem mais lentos do que os processos subtrativos) e a necessidade de uma representação geométrica tridimensional (3D) num sistema computacional de CAD (*computer aided design*).

A tecnologia de fabricação aditiva tem raízes em técnicas de representação tridimensional que remontam ao século XIX (BOURREL, et al., 2009) como a topografia e a fotoescultura. Mas foi somente na década de 1970 que o avanço tecnológico em outras áreas levou ao desenvolvimento e patenteamento de processos baseados na sinterização¹⁶ de pós metálicos por feixes eletrônicos, luz de lasers e plasmas. O barateamento dos computadores com o advento do PC nos anos '80 levou a um rápido crescimento do uso e das variedades de processos fabris aditivos a partir do final daquela década e dos anos '90. A Figura 3 ilustra alguns tipos de processos de fabricação aditiva, contendo a descrição de cada um deles (em inglês).

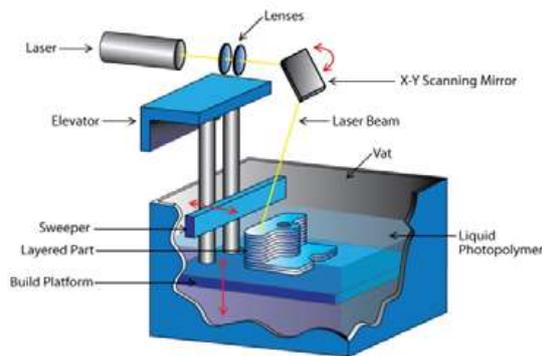
O mercado mundial de produtos e serviços de fabricação aditiva em 2011 foi da ordem de US\$ 1,7 bilhões¹⁷. Pequenas “impressoras 3D pessoais” já podem ser encontradas no exterior com preços entre US\$ 1000 e 2000.

No início, os produtos fabricados com essa tecnologia eram utilizados como apoio à engenharia (visualização, modelos funcionais) e para a prototipagem rápida de peças e componentes. À medida que os equipamentos e processos foram evoluindo novas aplicações foram encontradas como a fabricação de moldes e ferramental e a fabricação de propriamente dita de itens finais. Hoje, a fabricação aditiva pode ser feita em materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos e até mesmo orgânicos.

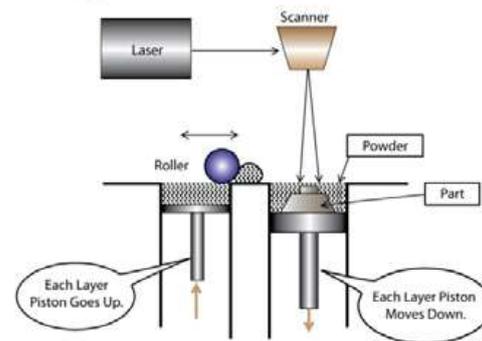
¹⁶ Sinterização é um processo pelo qual o material em pó é aquecido abaixo da sua temperatura de fusão e, por meio de difusão e reações em estado sólido, é aglutinado e compactado.

¹⁷ Ver notícia em <http://www.plasticsnews.com/article/20120606/NEWS/306069925/additive-manufacturing-market-hits-1-7-billion>

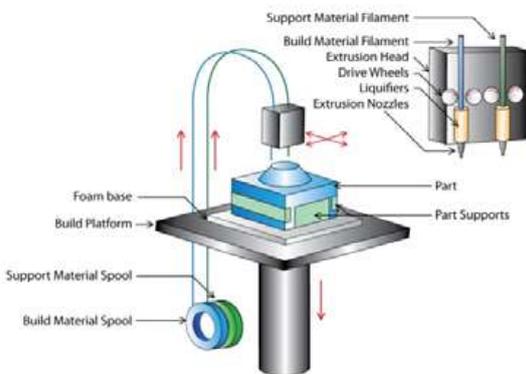
Selected Additive Manufacturing Processes



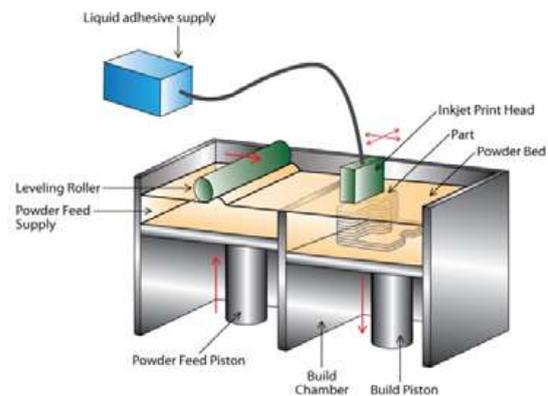
Stereolithography—This process makes use of photo-curable plastic resins that are treated by UV laser to become solid or gel-like and is most often used for prototyping (Hopkinson 2010).



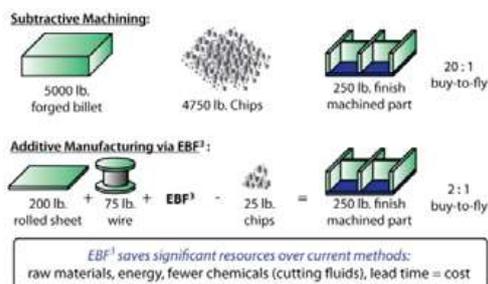
Powder bed (laser) sintering—Laser sintering fuses together powder from a bed. Originally, laser sintering could produce polymer as well as metallic and ceramic parts (using each type of powder), with binders needed in the case of metal or ceramic powders. Recently, more powerful lasers have been used to directly sinter metal and ceramic without the use of binders (Hopkinson 2010).



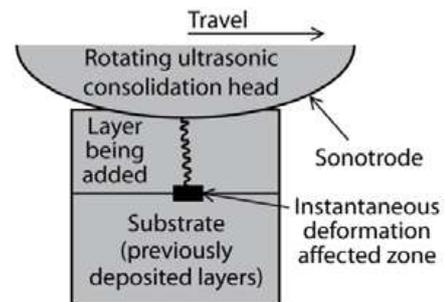
Fused deposition modeling (FDM)—This process uses hot nozzles to extrude polymeric material into position, using one nozzle to extrude support material and a second to extrude the part.



Inkjet Deposition (3D Printing)—This process uses an inkjet similar to those found in 2D printers. It works by depositing a binder on a powder bed that joins the powder in each layer without the use of lasers.



Electron beam melting or e-beam melting (EBM)—This is a process that uses an electron beam in place of a laser to directly melt metal powder into parts. (Arcam, a Swedish manufacturer, has pioneered the use of electron beam melting (Taminger 2008).)



Ultrasonic consolidation (UC)—One of the newest additive manufacturing technologies, patented by an American company called Solidica and in development by Solidica and the Edison Welding Institute (Slattery 2011). This process uses metal foils held together under pressure, combined with ultrasonic vibrations that create a weld between layers of foil, which are then machined to the desired shape (Domack and Baughman 2005).

Figura 3 - Exemplos de processos de fabricação aditiva (IDA, 2012)

Pelo menos a curto e médio prazo, algumas considerações limitam as situações em que é aplicável a fabricação aditiva para a produção direta de partes e peças:

- Pequenos lotes. Como os processos aditivos são mais lentos e custosos (assim como os materiais utilizados), há um compromisso entre o preço final pretendido, o volume fabricado e a flexibilidade requerida na produção.
- Tamanho da peça. O tamanho dos equipamentos de fabricação aditiva e sua baixa velocidade de produção limitam atualmente a aplicação da tecnologia a peças pequenas, da ordem de 1 ft³ ou 28 dm³ (28 litros).
- Valor do produto. As considerações de custo e velocidade de produção recomendam a aplicação da fabricação em peças e produtos de alto valor unitário.
- Complexidade geométrica. A fabricação aditiva é bastante competitiva quando se trata de produzir peças com uma geometria complexa, especialmente na parte interna do item.

Um *roadmap* elaborado por pesquisadores e engenheiros atuantes na tecnologia destacou alguns setores que apresentam uma expectativa de impacto significativo (BOURREL, et al., 2009), comentando suas necessidades e potenciais impactos. A Tabela 2 resume as informações dessa referência. Praticamente todos os setores descritos já têm alguma empresa atuando no mercado ou, pelo menos, estágios avançados de demonstração de viabilidade tecnológica.

Tabela 2 - Setores com potencial impacto e respectivos comentários

Setor	Comentários
Aeroespacial	Existe uma demanda por peças leves, resistentes e, muitas vezes, eletricamente condutoras que poderia ser suprida com essa tecnologia. Ainda há uma carência de padrões de qualidade para atender os requisitos aeronáuticos. Há notícia de testes de uso da tecnologia para fabricar lâminas de turbinas de avião, o que poderia transbordar para outras áreas que envolvem turbinas a gás, como a indústria naval e de geradores de energia.
Militar	Os requisitos de qualidade são comparáveis ao do setor aeroespacial. Muitos produtos têm alto valor unitário, complexos, produzidos em pequenos volumes, personalizados. Também há espaço para a fabricação de peças de reposição de equipamentos antigos que já deixaram de ser fabricados mas que ainda são mantidos em uso nas forças armadas.
Automotivo	O potencial a longo prazo é grande. No curto prazo, o foco seria em veículos esportivos (carros e motocicletas) e em carros de luxo, onde a exclusividade é mais importante do que o custo.
Eletrônica	Já foi demonstrada em laboratório a produção de placas de “circuito impresso” em 3D, similares aos PCBs, mas que podem ser formatados para seguir os contornos do produto final, abrindo a possibilidade inverter a lógica atual dos produtos eletrônicos, em que o produto é desenhado para acomodar as placas. Outra possibilidade interessante é fabricação de micro geradores

eletroquímicos de energia para alimentar os equipamentos. Esses geradores são estruturas muito pequenas, contendo partes isolantes (por exemplo, plásticas) e outras condutoras ou catalíticas (metais).

Biomédico e odontológico	A tecnologia está sendo pesquisada para aplicações em implantes médicos, engenharia de tecidos biológicos e medicina regenerativa. Próteses de quadril já foram fabricadas aos milhares segundo o estudo referido. Nessa linha, inclusive por questões de tamanho, o mercado de produtos dentários é extremamente promissor.
Joalheria	Outro segmento que claramente pode se beneficiar das possibilidades da fabricação aditiva. Além de metais e ligas não-preciosas, já foi demonstrada a sinterização de ligas de ouro e a fabricação de joias semipreciosas.
Decoração e acessórios diversos	Pequenas esculturas, acessórios de mobiliário, decoração e brindes constituem um ramo de indústrias naturalmente adequado para o emprego da fabricação aditiva, especialmente à medida que caem os custos dos equipamentos de impressão 3D.
Brinquedos	Se o preço de uma impressora 3D chegar à faixa das impressoras de jato de tinta, por exemplo, abre-se um enorme potencial para que as crianças passem a fabricar seus próprios brinquedos. O modelo de negócio pode ser similar ao das impressoras atuais, recuperando-se o custo do investimento pela venda da recarga de materiais e venda em grandes volumes. Outro negócio surge conjugado: sítios na web com uma biblioteca digital de bonecos, máquinas, peças, etc para a configuração individual dos brinquedos.
Alimentos	A fabricação aditiva de alimentos (chocolates, coberturas) em formas tridimensionais já foi demonstrada e abre as portas da tecnologia para um enorme mercado.
Ensino	Como aconteceu com o computador pessoal, é bastante razoável antecipar a incorporação da tecnologia de impressão 3D e fabricação aditiva em atividades escolares, sem contar, naturalmente, o ensino superior, especialmente de engenharia.

A fabricação aditiva ainda não tem uma difusão ampla, apesar do potencial do processo, inclusive para reduzir o *time-to-market* de certos produtos, a integração com o ambiente digital e a simplificação das cadeias de fornecimento, dos estoques de insumos e partes e da manutenção do produto final. O custo dos equipamentos, materiais e manutenção é um obstáculo para que isso aconteça. Nessa linha, a troca do processo convencional de fabricação pelo novo deve proporcionar um ganho de 30 a 40% para ser atraente. Os riscos percebidos em adotar a nova tecnologia variam de empresa para empresa, mas pequenos ganhos não justificam, em geral, a substituição tecnológica quando a novidade ainda traz muitas incertezas. (BOURREL, et al., 2009).

O amadurecimento da fabricação aditiva para se tornar um método muito difundido pode levar ainda alguns anos. Pelo menos duas grandes categorias de avanços são

necessários para amadurecer a tecnologia: a garantia de processos confiáveis e reproduzíveis e o custo acessível (BOURREL, et al., 2009).

A grande maioria das máquinas existentes até o final da década passada eram baseadas numa concepção voltada apenas para a prototipagem rápida e impressão 3D. Confiabilidade e reprodutibilidade passam pela existência de máquinas projetadas para o ambiente de produção. Isso requer sistemas de controle e *feedback* dos vários parâmetros envolvidos na fabricação. No nível básico, é necessária melhor compreensão dos mecanismos microscópicos envolvidos na “colagem atômico-molecular” dos diferentes materiais. Um recurso interessante para isso é a simulação computacional dos processos físico-químico pertinentes, uma abordagem já bastante comprovada, por exemplo, na microeletrônica e em outros segmentos da área de materiais.

O desenvolvimento e a adoção de padrões robustos é um ponto de extrema importância. A certificação, principalmente de materiais, é um fator crítico para a aceitação da nova tecnologia.

Quanto à questão dos custos, é de se esperar a redução do preço dos equipamentos com a escala da demanda. Porém, máquinas mais simples e processos mais rápidos devem contribuir ainda de forma mais significativa para o aumento da demanda. A existência de oferta competitiva de insumos (materiais) por fornecedores independentes é outro fator muito importante para a ampla difusão da fabricação aditiva.

Praticamente tudo o que foi comentado até aqui focaliza o processo de fabricação em si e suas vantagens e problemas no contexto dos vários setores industriais. Com exaltado entusiasmo, a revista *The Economist* saudou essa tecnologia como capaz de provocar “a terceira revolução industrial”¹⁸, o que parece um exagero, certamente.

No entanto, com entusiasmo mais embasado, o professor do MIT Neil Gershenfeld destacou que a verdadeira revolução não é exatamente o processo aditivo de fabricação *per se* em oposição aos métodos subtrativos convencionais, mas sim “a habilidade de converter dados em coisas e coisas em dados” (GERSHENFELD, 2012). Esta capacidade é que efetivamente traz para o ambiente da manufatura a verdadeira quebra radical proporcionada pela digitalização.

As consequências dessa ruptura são várias:

- A personalização, isto é, a possibilidade de se fabricarem produtos para uma só pessoa (a um custo razoável);
- A possibilidade de enviar dados à distância e produzir bens localmente, sob demanda, mas sem os problemas da logística de distribuição;
- A criação de novos negócios, como a de pequenas “fábricas” prestadoras de serviços de produção sob demanda, análogos às lojas de impressão rápida existentes hoje em dia;

¹⁸ *The Economist*, edição de 21/04/2012. Em <http://www.economist.com/node/21552901>

- Ou ainda, de sites especializados em “aplicativos” e “bibliotecas” de objetos para composição de outros, mais complexos, reduzindo o custo de engenharia e ferramental;
- No limite, a disponibilidade de “materiais digitais” e montadores (*assemblers*) capazes de adicionar e remover partes de um conjunto discreto.

A pesquisa de Gershenfeld e outros cientistas pode ser descrita como semelhante a um LEGO versátil. Um “material digital” tem as seguintes propriedades: um conjunto discreto de componentes; um conjunto discreto de posições e orientações possíveis para esses componentes e o controle explícito de colocação desses componentes. Essas propriedades permitem a uma criança fabricar estruturas cuja precisão constitutiva é superior, frequentemente, à precisão de movimento da criança.

A Natureza também tem seu LEGO microscópico. Os ribossomos são estruturas proteicas intracelulares, capazes de produzir outras proteínas a partir de 22 aminoácidos com regras definidas a partir de um código inscrito no DNA. A ideia de pesquisadores como Gershenfeld é explorar esse potencial construtivo ao ponto de torná-lo prático e corriqueiro.

Outra abordagem de explorar o potencial da fabricação aditiva é a criação de uma comunidade *open-source*, como ocorreu com o software livre. Espera-se, com isso, uma ampla difusão da tecnologia nascente, solução e aperfeiçoamento de seus problemas e descoberta de novas aplicações. Um projeto nesse sentido, Fab@Home, vem sendo liderado pela Universidade de Cornell¹⁹, nos EUA.

O potencial da fabricação aditiva invade áreas normalmente fora do contexto industrial tradicional. Até mesmo a fabricação de tecidos biológicos e órgãos é possível com essa tecnologia, não havendo nenhuma restrição de princípio para essa aplicação²⁰.

A despeito dos cenários em geral otimistas, a quantificação do real impacto da manufatura aditiva na produtividade da economia de um país é uma questão controversa. Cabe mencionar, por exemplo, a opinião cética de Robert Gordon, para quem a impressão 3-D representa um recuo dos ganhos de economias de escala e eficiência obtidos com a linha de montagem de Henry Ford. Na visão de Gordon, trata-se uma tecnologia que aumentará, com certeza, a produtividade dos laboratórios de desenvolvimento e algumas operações customizadas, mas seu potencial é limitado para promover o crescimento da produtividade na economia como um todo (GORDON, 2014).

4.1.2 Panorama brasileiro

Não foi encontrado nenhum estudo amplo sobre a situação dessa área específica no Brasil por parte de entidades como a ABDI e CGEE.

Um levantamento apresentado no 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (VOLPATO & COSTA, 2013) relacionou 23 grupos de pesquisa na área. 44% dos grupos

¹⁹ Ver o sítio web <http://www.fabathome.org/>

²⁰ Um breve vídeo no sítio web *Physics World*, do *Institute of Physics* (UK) explica esse uso da tecnologia aditiva ou da impressão tridimensional:
<http://physicsworld.com/cws/article/multimedia/2013/feb/20/can-we-print-human-body-parts>.

estão na Região Sudeste e 44% na Região Sul. Na relação encontram-se entidades públicas e privadas, de ensino e pesquisa e de pesquisa e serviços. O foco principal dos trabalhos de pesquisa é prototipagem e manufatura rápida. A maioria dos grupos também presta serviços de manufatura aditiva, porém, 33% da prestação de serviços é para fins de pesquisa, não envolvendo empresas. Cerca de 2/3 dos grupos atua no desenvolvimento de tecnologia própria, principalmente com materiais poliméricos (48%), cerâmicos (30%) e metálicos (26%).

Cabe destacar que o Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, do MCTI, em Campinas, há muitos anos desenvolve um programa de P&D em tecnologias tridimensionais²¹, com um histórico mais de 5.000 serviços tecnológicos de prototipagem e manufatura rápida para a indústria, e linhas de pesquisa em prototipagem e manufatura rápidas, aplicações biomédicas e bioimpressão.

4.2 Materiais avançados

Materiais são indispensáveis à indústria manufatureira e o progresso das tecnologias industriais está intimamente ligado ao progresso em ciência e engenharia de materiais. Existe uma cadeia de relações entre a estrutura do material e suas propriedades físico-químicas e daí para as aplicações. Daí ser bastante comum nos estudos prospectivos abordar a questão dos materiais numa perspectiva setorial. Trata-se, por assim dizer, de uma análise “vertical”. Propõe-se aqui uma abordagem diferente: comentar alguns padrões e tendências mais gerais, “horizontais”, invocando-se exemplos de diferentes setores quando apropriado.

4.2.1 Tendências gerais

A Sociedade Europeia para Pesquisa de Materiais publicou recentemente um interessante estudo sobre materiais para tecnologias habilitadoras (E-MRS, 2011). Quatro direções principais foram apontadas como determinantes e merecedoras de atenção e apoio para a manutenção da competitividade europeia. Não obstante seu foco regional, as quatro direções indicadas são bastante representativas das tendências globais da P&D em materiais avançados. As áreas são comentadas a seguir.

- **Pesquisa em materiais com propriedades novas ou aperfeiçoadas**

Essa direção de desenvolvimento costuma ser guiada pela demanda setorial. Determinadas aplicações (por exemplo, menor quantidade de defeitos em materiais eletrônicos) provocam desenvolvimentos incrementais nos processos de obtenção e fabricação dos respectivos materiais ou mesmo o desenvolvimento de ligas e compostos originais. Entretanto, o advento da nanotecnologia e de intensa modelagem computacional tem frequentemente invertido o sentido: novos materiais

²¹ Ver o sítio web: <http://www.cti.gov.br/apresentacao-dt3d>

têm sido sintetizados, apresentando propriedades inesperadas e com grande potencial de aplicação, como é o caso do grafeno²².

Outros materiais de interesse têm sido desenvolvidos nas fronteiras entre os mundos orgânico e inorgânico – membranas para processos de separação, polímeros funcionais para eletrônica flexível, eletrodos para baterias de estado sólido, materiais para células de combustível, polímeros para empacotamento, materiais super isolantes e muitos outros.

- **Desenvolvimento de abordagens racionais na concepção de materiais avançados ou na sua integração em estruturas e sistemas**

Ao longo da civilização, os materiais foram costumeiramente concebidos ou escolhidos de maneira a atender uma determinada função, função essa conjugada a uma propriedade dominante, por exemplo, resistência mecânica ou condução elétrica. A tendência atual, no entanto, aponta para a necessidade de materiais multifuncionais, que atendam simultaneamente a critérios múltiplos de especificação. Essa multifuncionalidade é obtida da coexistência no material de um conjunto de propriedades distribuídas em diferentes escalas, da escala atômica até a escala macroscópica.

Obter materiais que satisfaçam simultaneamente vários critérios depende de uma noção detalhada dos mecanismos que controlam as propriedades e uma modelagem das propriedades esperadas. A partir desse conhecimento é possível avaliar o potencial e as possibilidades oferecidas pelas diferentes formas de cada material e pela combinação das diferentes classes de materiais.

Muito importante também é o problema do casamento das propriedades das interfaces entre os materiais, que se reconhece como um elemento crítico para várias a obtenção de várias propriedades. Esse é um desafio tecnológico que requer novas técnicas de processamento e conformação de materiais bem como o desmonte para o aproveitamento da reciclagem de itens descartados.

Essa direção se articula com a primeira, pois o aproveitamento das novas propriedades e a concepção de sistemas e materiais costumam advir de demandas setoriais específicas. O setor de transportes, por exemplo, requer redução de peso e extensão da vida útil; o setor de energia requer operação em condições severas. O problema aqui é a busca pela otimização dos processos de fabricação, integração e operação dos materiais.

Um meio para superar esse desafio é a “Engenharia de Materiais Computacional Integrada”, em inglês, *Integrated Computational Materials Engineering*, ICME. Essa disciplina consiste na integração de informações dos materiais, capturada em ferramentas computacionais, com a análise de engenharia do desempenho dos produtos e com a simulação dos processos de manufatura (IDA, 2012).

²² O grafeno é uma substância composta apenas por átomos carbono, dispostos em forma hexagonal, como no grafite, mas cuja espessura é somente uma camada atômica. Seu principal potencial de aplicação é na indústria eletrônica.

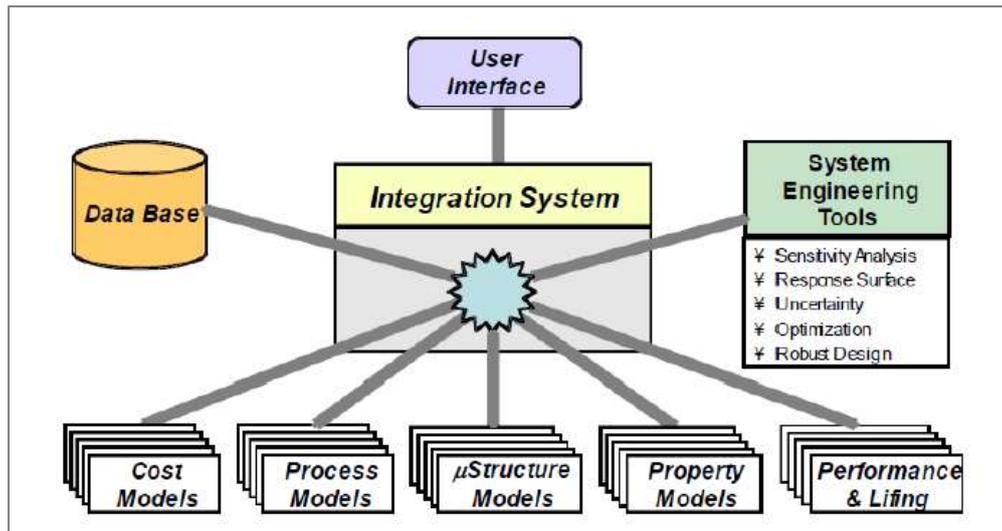


Figura 4 - Elementos de um sistema de ICME (IDA, 2012, p. 32)

Embora seja ainda uma abordagem muito recente, já existem exemplos práticos industriais de como essa abordagem pode produzir ganhos tecnológicos com impacto significativo em produtividade e custo. Um exemplo: a fabricante norte-americana de turbinas aeronáuticas Pratt & Whitney aplicou a ICME no projeto e fabricação dos rotores de turbinas a jato. A abordagem mostrou ser possível atuar sobre a geometria da peça e sobre os processos de tratamento térmico e conformação mecânica. O resultado impactante para a integração dos rotores no produto final foi uma redução de 21% no peso do metal forjado, com diminuição do custo total e ganho de desempenho. Simultaneamente, a velocidade de ruptura do disco (*burst speed*) aumentou em 19%, outro ganho sistêmico importante (NRC, 2008).

- **Inspiração pela Natureza: promoção do *eco-design*, da bioinspiração e do uso de materiais naturais**

Muitas características de materiais naturais, como osso e madeira, baseiam-se na sua organização topológica e estrutural em diferentes escalas – nanométrica, micrométrica e milimétrica. A ideia dessa linha de pesquisa e desenvolvimento é projetar e desenvolver materiais ajustando sua organização em diferentes escalas para obter a funcionalidade requerida, mimetizando a forma com que a Natureza costuma “trabalhar”. Conceitos e princípios da biotecnologia e da “química verde”²³ devem ser incorporados à engenharia de materiais.

Além disso, pressões sociais e políticas em todo o mundo favorecem a concepção de novos produtos e processos que levem em conta questões ambientais e sustentabilidade.

²³ A “química verde” é uma filosofia de trabalho da Química e da Engenharia Química que busca desenvolver produtos e processos que minimizem o uso e a geração de substâncias nocivas ou perigosas.

- **Antecipação e controle do desempenho de materiais durante o seu ciclo de vida, incluindo estruturas inteligentes (*smart structures*) que permitam o auto sensoramento e a autocorreção**

O objetivo dessa direção tecnológica é prever o comportamento dos materiais durante o seu ciclo de vida e ajustar essa duração ao uso do material. Uma forma de alertar para problemas com os materiais e eventualmente corrigi-los sem intervenção externa é integrando-os a discretos sensores e atuadores, quando possível nos mesmos materiais. (Para ilustrar o princípio: materiais conjugados, ou compósitos, podem ser constituídos de fibras de carbono e resinas. A resistência elétrica serve para monitorar alguma ruptura no material. Uma corrente mais forte pode gerar calor localmente e provocar a difusão de moléculas “embutidas” na resina e assim preencher o vazio criado pela ruptura).

Muitas dessas propriedades extraordinárias dos materiais são de mais provável aplicação em eletrônica e ótica, bem como na geração e armazenamento de energia. *Smart structures*, por outro lado, são de aplicação típica em materiais estruturais. Em qualquer caso, à medida que a pesquisa nas quatro direções apontadas amadureça e produtos comecem a ser comercializados, o impacto sobre áreas tradicionais deve ser grande, não se devendo esperar apenas o surgimento de novas áreas de negócio. Contudo, como as novas tecnologias geralmente chegam ao mercado relativamente caras, é razoável supor que a sua adoção em áreas consideradas de baixo conteúdo tecnológico (por exemplo, construção civil) seja lenta.

É importante destacar que a tecnologia de materiais se relaciona bastante com a nanotecnologia, pois modificações nas propriedades nanométricas podem causar modificações macroscópicas nos materiais, implicando no surgimento de outro potencial de aplicação, muitas vezes inesperado.

4.2.2 Áreas de aplicação

Relacionar os problemas de materiais que são críticos para o avanço dos vários segmentos industriais ou a agenda de pesquisa para satisfazer os requisitos de todos eles é um exercício exaustivo. O trabalho da Sociedade Europeia para Pesquisa de Materiais já mencionado relaciona algumas áreas, mas seu foco é a estratégia europeia de tecnologias habilitadoras: energia (produção, conversão e armazenamento) e o grupo da microeletrônica, nanoeletrônica e fotônica. Também é citado o impacto na nanotecnologia e na fronteira entre a tecnologia de materiais com a biotecnologia e biomedicina²⁴.

Numa avaliação para a TMS – *The Metal, Mineral and Material Society*, dos EUA – o cientista D. Appelian relaciona algumas áreas que, na sua visão, mais se beneficiam das novas tecnologias de materiais (APPELIAN, 2007):

²⁴ Não se deve esquecer que a manufatura aditiva pode ser vista também como uma dimensão da tecnologia de materiais.

- **Recursos de energia e materiais para armazenagem de energia.**

Duas forças atuam nesse segmento: o aumento da demanda global de energia e a pressão conservacionista-ambiental. De um modo geral, a expectativa global é pelo aumento do uso de fontes renováveis, hidroelétrica, eólica, geotérmica, biomassa e ainda a energia solar (conversão fotovoltaica). Enquanto as primeiras demandam avanços incrementais nos materiais para que atender os requisitos de custo e de ciclo de vida sempre mais exigentes, a conversão fotovoltaica ainda depende de um grau de maturidade maior: existem muitos materiais concorrentes e, apesar dos fortes subsídios governamentais, ainda não foi possível atingir uma razoável competitividade com outras fontes²⁵.

A chamada “economia de hidrogênio” é uma demandadora importante de materiais. Há dois usos principais: no esforço de armazenar hidrogênio para uso como combustível e na fabricação de células de combustível, que convertem energia química em elétrica. Essa é uma aplicação mais concreta a curto e médio prazo, o desafio sendo o de construir células de maior potência e duração da carga.

- **Transportes**

Nos transportes, a questão do combustível está ligada ao desafio geral da energia, descrito acima. Ainda que muito desejados, os carros elétricos ainda deverão continuar caros e ter uma difusão limitada por um bom tempo. Seu desenvolvimento depende de baterias, cujo nó tecnológico não está completamente desfeito, tanto em termos técnicos quanto de custo. Isso significa que haverá demanda por melhorias nos veículos movidos por derivados do petróleo, gasolina ou diesel provavelmente (no caso brasileiro, o etanol não pode ser descartado).

Em termos gerais, sem se considerar o problema do combustível, há duas frentes importantes na tecnologia de materiais aplicada aos transportes: o desenvolvimento de materiais estruturais leves e resistentes, como ligas especiais de alumínio, componentes de magnésio, “espumas metálicas”; e materiais para acabamento como os conjugados (compósitos) à base de materiais naturais orgânicos ou recicláveis – fibras naturais combinadas com resinas, fibras de linho e polímeros, ou resinas derivadas de milho ou soja.

Em ambos os casos, é razoável supor que o uso desses materiais em larga escala na indústria automotiva provoque um transbordamento para outros setores, por exemplo, o moveleiro.

- **Construção civil**

A difusão das preocupações com a sustentabilidade do ambiente e o consumo e eficiência de energia é um fator de impulso do desenvolvimento de novas tecnologias na construção civil, em especial de materiais. Materiais conjugados (compósitos) com propriedades de regulação térmica, por exemplo, já foram desenvolvidos e

²⁵ Muitas empresas de conversão fotovoltaica faliram, inclusive a chinesa Suntech, uma das maiores, senão a maior fabricante mundial de painéis fotovoltaicos, que pediu falência em março último (*The Economist*, March 21, 2013).

testados. O uso de fibras, tanto naturais quanto sintéticas, para reforçar materiais estruturais é outra área em que ocorre grande desenvolvimento.

- **Embalagens**

O aumento da população urbana e dos níveis de consumo dos mais variados bens implica no aumento do problema de descarte e reciclagem de materiais. As embalagens, particularmente, são parte importante desse problema. O desenvolvimento de materiais biodegradáveis é um exemplo do esforço por soluções para o problema.

É importante ter em mente que o desenvolvimento de uma embalagem requer conhecimento sobre vários fatores: as características do produto a ser embalado e sua utilização, o ambiente a que a embalagem estará exposta, o seu contexto geral (marketing, design, distribuição, conveniência, legislação, etc.). Se o produto for perecível (alimentos, medicamentos) as exigências são cada vez maiores por causa da conscientização do consumidor.

Ainda no que tange a embalagens, cabe destacar também que os avanços na reciclagem de produtos metálicos poderá ter um impacto significativo nos paradigmas de produção tanto de materiais ferrosos quanto não-ferrosos.

- **Biomateriais e saúde**

Um biomaterial é um material que interage com um tecido biológico para fins terapêuticos ou de diagnóstico. Trata-se de uma realidade crescente na medicina: pele artificial, regeneração de tecidos, válvulas cardíacas artificiais, *stents* coronarianos, apenas para citar algumas aplicações. Pesquisas de mercado estimam que os biomateriais alcancem um mercado global no valor de US\$ 88 bilhões em 2017²⁶. Em 2012, as aplicações cardiovasculares representavam 34,5% do mercado total e as ortopédicas outros 34,2%. A mudança da pirâmide etária, com o aumento da faixa de idosos, e a procura por melhor qualidade de vida tendem a impulsionar a demanda por biomateriais. Também o crescente peso da tecnologia na prática da Medicina contribui para a importância dessa área.

O potencial da área de materiais biomédicos é grande e se beneficia também da interrelação com as áreas de biotecnologia e manufatura aditiva. Exemplos de eventual aplicação em grande escala incluem próteses com superfícies tratadas para minimizar desgaste e reduzir o risco de infecções; dispositivos para liberação gradual de medicação; engenharia de tecidos biológicos e mimetizadores de células e órgãos funcionais. Pode-se dizer que, no futuro, os biomateriais desempenharão tanto funções estruturais quanto de regulação de atividade biológica.

4.2.3 Panorama brasileiro

O CGEE publicou em 2010 um alentado estudo prospectivo sobre materiais e o Brasil num horizonte de 10 anos (CGEE, 2010). O relatório compreendeu oito temas ou áreas, algumas claramente verticais como energia e saúde, outras de características

²⁶ Markets&Markets: <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biomaterials-393.html>

horizontais como a de materiais obtidos a partir de recursos naturais. As áreas cobertas foram:

- Defesa nacional e segurança pública.
- Eletrônica, magnetismo e fotônica.
- Setor espacial.
- Energia.
- Meio-ambiente.
- (Obtenção) a partir de recursos naturais.
- Saúde médico-odontológica.
- Tribologia²⁷.

O estudo é, na realidade, uma coletânea de estudos setoriais. O resultado é desigual. Percebe-se que as recomendações de cada capítulo (um para cada área) têm a preocupação de encaminhar soluções para o seus problemas isoladamente, variando desde recomendações eminentemente técnicas com outras voltadas a políticas clássicas de estímulo a P&D de caráter mais acadêmico do que prático. As conclusões do capítulo referente a materiais eletrônicos, magnéticos e fotônicos, por exemplo, abrangem desde sugestões para *“inovar em magnetos permanentes nanocristalinos com temperaturas de Curie acima de 400°C e magnetização espontânea maiores do que 1,6MA/m”* até *“estabelecer mecanismos de apoio ao consórcio de empresas, universidade e institutos de pesquisa nacionais em ações cooperativas na pesquisa pré-competitiva em materiais eletrônicos, e em microeletrônica em geral”*, passando pelo tradicional apelo à formação de recursos humanos e à constituição de consórcios entre empresas e universidades.

Existem capítulos que parecem equilibrar satisfatoriamente a visão acadêmica com a de produção e a de aplicação dos desenvolvimentos tecnológicos. Num tema crítico como o de materiais para a saúde, por exemplo, o documento aprofunda a discussão em torno de grandes temas já apontados, colocando-os na perspectiva brasileira, acrescentando ainda o tema dos materiais dentários: materiais para implantes ortopédicos; materiais para próteses endovasculares (*stents*); materiais dentários; de materiais nanoestruturados para diagnóstico e tratamento de doenças; materiais carreadores para sistemas de liberação controlada (SLC); e materiais para engenharia tecidual. A ênfase é grande no desenvolvimento local desses materiais, pois se trata de um setor com peso importante na agenda de serviços fornecidos pelo Estado: por um lado, existe demanda e, por outro, o Governo qual pode exercer seu poder de compra como forma de estímulo.

Outro capítulo interessante trata dos materiais avançados produzidos a partir de recursos naturais. O capítulo cobre oito temas, relacionados a seguir:

- Caracterização de materiais avançados e de suas fontes naturais;
- Rotas alternativas para produção de insumos básicos para fertilizantes;
- Produção de materiais agroquímicos avançados;

²⁷ Tribologia é o nome da ciência e tecnologia das superfícies que interagem em movimento relativo, isto é, do atrito.

- Reaproveitamento de rejeitos da atividade mineral e do agronegócio como insumos para produção de materiais avançados;
- Produção de materiais avançados a partir de óleos e gorduras;
- Produção de materiais avançados a partir de argilas;
- Produção de materiais avançados a partir de fibras naturais;
- Produção de materiais avançados a partir de borracha de látex natural.

Este capítulo também procura equilibrar as três visões – a acadêmica, a industrial e a de mercado potencial. Trata-se de uma área de grande sinergia com o setor agrícola e também com o setor de mineração e, por isso, tem potencial para atrair parcerias para o desenvolvimento tecnológico e para a construção de uma base industrial inovadora e competitiva no país.

4.3 Nanotecnologia

4.3.1 Aspectos gerais

Conforme registrado anteriormente, nanotecnologia é uma designação genérica para as tecnologias que lidam com a matéria em níveis moleculares, cujas dimensões são da ordem de 1 a 100 nanômetros (1 nanômetro = 1 bilionésimo de metro, 10^{-9} m). Para dar uma ideia das dimensões envolvidas, um fio de cabelo tem cerca de 80.000 nanômetros, um glóbulo vermelho 7.000 nanômetros, uma molécula de água 0.3 nanômetros (ROYAL SOCIETY, 2004). Essas tecnologias manipulam a estrutura da matéria e os fenômenos nessa escala de tamanho, fazendo com que materiais e dispositivos físicos, químicos e biológicos manifestem novas propriedades macroscópicas.

Há uma percepção internacional de que a nanotecnologia e a nanociência (ciência nas dimensões manométricas) representam um novo patamar de conhecimentos, com impactos científicos e econômicos consideráveis, embora ainda não totalmente avaliados (ABDI e CGEE, 2010). Todavia, também existe uma percepção corrente de que a nanotecnologia pode trazer riscos à saúde e ao meio ambiente maiores do que aqueles proporcionados por tecnologias já existentes. Foram levantados riscos diversos como, por exemplo, a inalação de partículas manométricas de materiais tóxicos; penetração de nanopartículas na pele e geração de reações bioquímicas indesejáveis; efeitos nocivos na cadeia alimentar; aumento do risco de combustão e muitas outras (ROYAL SOCIETY, 2004)²⁸. Por extensão, considerações de natureza ética e social também costumam ser levantadas.

Os impactos da nanotecnologia podem ser melhor apreciados examinando-se a Figura 5. Um painel internacional sobre riscos e governança dos riscos da nanotecnologia (IRGC, 2006) propôs um arcabouço para classificar as “gerações” da nanotecnologia. A preocupação foi mais com o contexto dos riscos associados e a sua governança do que propriamente com fases tecnológicas ou fases de impacto econômico. Não obstante, o arcabouço, representado sinteticamente na Figura 5, serve também para compreender a rápida evolução da tecnologia.

²⁸ Ver também (IRGC, 2006).

Brevemente, a 1ª geração seria a das nanoestruturas passivas, cujas propriedades e comportamentos seriam razoavelmente constantes e estáveis durante o uso. Na 2ª geração, as nanoestruturas são ativas, isto é, suas propriedades são projetadas para mudar durante a operação de modo que seu comportamento é variável e potencialmente instável. Na 3ª geração, nanoestruturas passivas ou ativas são integradas em sistemas por meio de técnicas de montagem ou de síntese manométrica. O caráter sistêmico, sua complexidade e as diversas interações entre componentes podem levar a comportamentos emergentes não previstos.

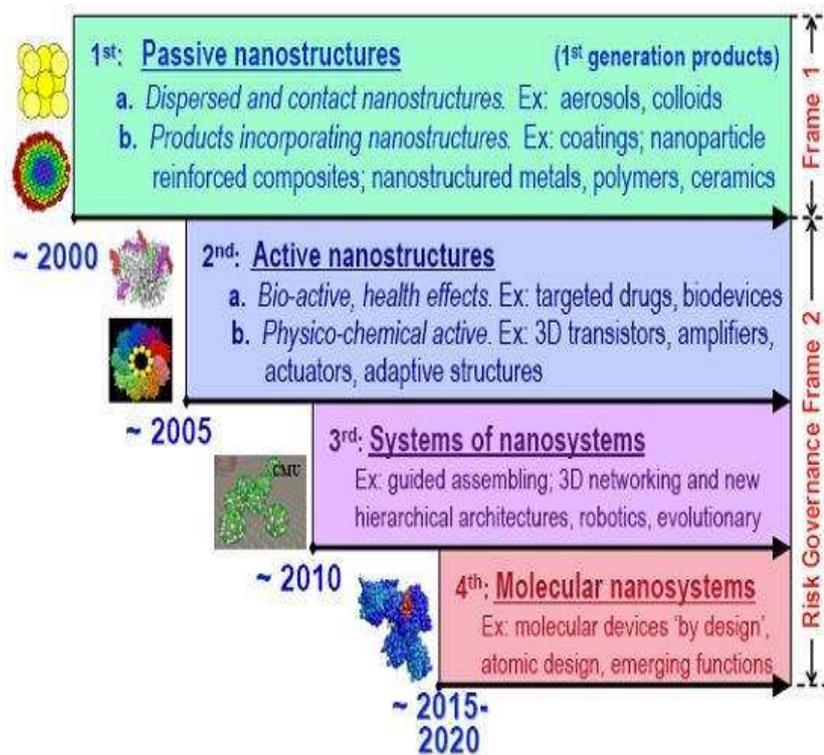


Figura 5 - Gerações da nanotecnologia. (Fonte: <http://crnano.org/whatis.htm>)

A 4ª geração se caracterizaria por nano sistemas projetados para executar determinada função e criados partir de componentes moleculares com estruturas específicas. Este projeto seria análogo ao de um projeto de engenharia e novas funções podem surgir, principalmente baseadas em comportamentos dos sistemas biológicos. Observe-se que as datas na figura são indicativas da época em que produtos estariam disponíveis mas elas refletem mais a expectativa de acontecimento do que propriamente a disponibilidade comercial. Embora um ou outro protótipo de nano sistema seja reportado na literatura científica, a realidade comercial é predominantemente de 1ª geração, com alguns produtos de 2ª geração.

Deve-se destacar que produtos de nanoestruturas existem há décadas, muito antes da introdução do termo nanotecnologia. A sílica, principal componente da areia e matéria-prima para a produção do vidro, e o negro de fumo (“fuligem”) , utilizado em graxas, tintas e toners de impressoras, são exemplos de materiais de nanotecnologia usados há muitos e muitos anos (MINI-IGT, 2010). Mais sofisticada, a indústria eletrônica trabalha

com dimensões submicrométricas e nanométricas também há muito tempo, como é o caso da indústria de circuitos integrados a semicondutores .

Na verdade, a nanotecnologia tem um impacto ao longo de uma cadeia de valor: materiais nanoestruturados servem de matéria-prima a compostos intermediários até chegar a produtos finais que incorporam esses materiais. Ou ainda, como acontece na eletrônica, dispositivos de dimensões manométricas são combinados aos milhões para constituir circuitos funcionais. Essa abrangência causa incertezas adicionais na avaliação do mercado de nanotecnologia, já que frequentemente não se consegue distinguir a parte que cabe aos materiais e dispositivos manométricos e o que cabe a produtos finais. Um estudo britânico de 2010, por exemplo, reportou projeções das oportunidades de mercado mundiais para 2015 que variavam de US\$ 750 bilhões e US\$ 3,1 trilhões (MINI-IGT, 2010).

Essas cifras são excessivamente otimistas. Ainda no Reino Unido, o *Technology Strategy Board*, braço do Governo britânico que age como agência de inovação, utilizou números consideravelmente mais conservadores para o mercado mundial de nanotecnologia (TSB, 2009), usando como base os setores impactados. Isso é mostrado na Tabela 3. Nela, os setores de atividade econômica foram ordenados de forma decrescente.

Tabela 3 – Mercados impactados pela nanotecnologia (TSB, 2009)

Setor	Receita da nanotecnologia em 2007 (US\$ milhões)	Projeção da receita da nanotecnologia em 2015 (US\$ milhões)
TICs	585	41.402
Automotivo	404	7.134
Construção naval	357	4.295
Defesa e aeroespacial	323	3.768
Alimentos e bebidas	265	3.210
Bens de consumo	188	6.225
Ciências da vida e saúde	145	5.670
Têxteis	122	2.170
Energia	90	3.615
Ambiente e água	86	3.885
Construção civil	66	1.672
Segurança de produtos e marcas	30	2.650
TOTAIS	2.661	85.996

É claro que há muitas expectativas de que a pesquisa laboratorial deságue em produtos comerciais rapidamente. Essa “confiança” não é incomum no cientista ou engenheiro e pode ser detectada, por exemplo, nas datas exibidas na Figura 5.

Quando se examina com mais detalhe o tipo de tecnologia ou de aplicação que está em desenvolvimento é possível avaliar o que está ou não maduro para aplicação em larga

escala. Os mencionados estudos britânicos (TSB, 2009) e (MINI-IGT, 2010) fazem isso utilizando o conceito de “*Technology Readiness Level*”. O “*Technology Readiness Level*” ou simplesmente TRL é um conceito utilizado nos EUA pela NASA e pelo Departamento de Defesa que classifica numa escala de 0 a 9 o grau de maturidade ou “prontidão” (*readiness*) de uma determinada tecnologia para ser aplicada no ambiente espacial ou no ambiente de defesa. O nível mais baixo é o TRL 0 e o mais alto, TRL 9.

As definições de “prontidão tecnológica” costumam variar conforme o órgão que a utiliza. A escolha do presente relatório é descrita no Apêndice 1.

A Tabela 4 reproduz o mapeamento feito nos citados estudos britânicos por volta de 2009.

4.3.2 Panorama brasileiro

O Governo Federal tem uma ação estruturada em nanotecnologia, a Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia, IBN, sob responsabilidade do MCTI²⁹. Hoje há 26 redes temáticas e 16 Institutos Nacionais de C&T focados em nanotecnologia. São mais de 260 grupos de pesquisa atuando em nanotecnologia no Brasil.

A articulação em torno da nanotecnologia segue o modelo tradicional que conta com o predomínio dos grupos de pesquisa universitários e de alguns centros de pesquisa federais. Segundo informações do site do MCTI³⁰ os investimentos federais em nanotecnologia no ano de 2013 foram da ordem de R\$ 150 milhões, entre infraestrutura laboratorial e projetos, distribuídos em 10 programas (Rede SisNANO, INCTs, RHAE, editais, cooperação internacional, etc.).

A Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia tem os seguintes setores prioritários:

- Aeronáutico, aeroespacial e defesa.
- Agronegócio e alimentos.
- Energia.
- Higiene pessoal, perfumaria e cosméticos.
- Meio ambiente e Amazônia.
- Óleo e gás.
- Plásticos.
- Saúde.

O setor industrial não está alijado completamente. O MCTI tem organizado periodicamente workshops para a aproximação das empresas e das universidades e outros eventos costumam ocorrer também com patrocínio privado.

²⁹ <http://nano.mct.gov.br/>

³⁰ <http://nano.mct.gov.br/investimentos/>

O citado relatório (ABDI e CGEE, 2010) já relacionava vários produtos desenvolvidos no Brasil e que já utilizam nanotecnologia (quadro reproduzido na Tabela 5).

Em 2011, um estudo da FIRJAN estimou que o mercado de produtos empregando nanotecnologia desenvolvidos originalmente no Brasil foi da ordem de R\$ 115 milhões em 2010, uma fração diminuta do mercado mundial estimado em US\$ 383 bilhões (FIRJAN - DIMA, 2011). É fato que a amostragem do estudo é muito pequena, já que foram ouvidas apenas 56 empresas, pouco mais da metade das empresas apoiadas pela FINEP até 2007. Entretanto, segundo o mesmo relatório, o MCTI dava como sendo de 150 o número de empresas envolvidas em nanotecnologia em 2010.

Tabela 4 - Níveis de prontidão ou maturidade de aplicações de nanotecnologia.

Fonte: (TSB, 2009)

Challenge Area	Sector	TRL 8-9	TRL 6-8	TRL 2-6	TRL 0-2
Security	Aerospace and Defence	Composites for reinforcement.	Flame retardant materials for aircraft, protective coatings, lighter body armour (CNTs).	Self repairing structures, smart uniforms, sensors for biological and chemical threat detection, electronics in spacecraft.	Smart air/spacecraft.
Intelligent connected world	Electronics and ICT	Magnetic nanoparticles for data storage. Electronic nanoscale materials for dielectrics.	Flexible displays, nanocomposite heat management, nanowire electronic and photonic devices, nanosilver die attach.	Carbon nanotube single electron transistors, non volatile random access memory, molecular diodes, single hybrid molecular device, semiconductor single electron devices (quantum dots), graphene based circuits.	Molecular memory. Solid state quantum computing.
Security of supply/growing population	Energy	Nanocrystalline coated solar cells, nano porous aerogels, nanoparticle additives for energy efficiency.	Nanocatalysts for fuel cells. Nanomembranes for fuel cells.	Thermoelectric materials for heat conversion, carbon nanotube fuel cells and batteries, carbon nanotube hydrogen storage, polymer and hybrid photovoltaics.	Potential for wind power applications.
Ageing/growing population	Life Sciences and Healthcare	Nanotitania implants, nano-particle drug delivery, antibacterial coatings, healing wound dressings, lab-on-a-chip.	Dendrimers in biotechnology assay kits.	Biocompatible implants, magnetic nanoparticles as imaging agents, nanocoated stents for tissue engineering, non-invasive therapeutics using heat to treat cancer.	Smart materials for organ and limb replacements.
Low impact building	Construction	Strength increase/crack prevention, self healing additives to cement, exterior protection coatings, anti-graffiti coatings, self cleaning glass, nanoadditives to steel, heat blocking windows.	Aerogels for insulation, heat resistant materials.	Self repairing structural materials.	Smart sensors to monitor fracturing and flexibility, intelligent buildings.
Healthcare, modern world	Textiles	Self cleaning fabrics, wound dressings, healing textiles, antibacterial garments.	Fire retardant textiles.	Wearable computers, smart clothing, bioresponsive clothing.	Self healing textiles.
Security of water supply	Environment and Water	Air filtration, titania photocatalysts, nanoporous membranes for filtration	Nanoscale absorbents Desalination of sea water using nanomembranes; nanomaterial based products for water treatment (Nanofer)	Water purification using bio-nano, NEMS for sensing and acting on pollution.	
Growing population	Food and Drink	Nanoemulsions, nanocomposite barrier packaging, nanoporous membranes for processing.	Super hydrophobic surfaces, controlled release seed coatings, pathogen detection with nanoparticles.	Nanoencapsulated nutraceuticals, programmable barriers in coatings for atmospheric control, electronic tongue.	Smart paper for information display and packaging.
Quality of life	Consumer Goods and Household Care	Easy clean coatings for surfaces, self cleaning tiles, nanosilver cosmetics and oral care, nanoencapsulation for beauty care, nanocomposite sporting goods.	Nanocoated wipes for surfaces, self cleaning sprays (short lasting).	Nanoencapsulation for household hygiene and fragrancing.	Long term self cleaning wipes and sprays, nanoelectronics in leisure equipment.
Security	Brand and Product Security	Intelligent inks, nanoparticles for security printing.	Paper like electronic displays for condition information, magnetic nanoparticle tagging.	Decontaminating surfaces, nanoparticle chemical markers.	Smart dust for decontamination.
Transport, defence	Shipbuilding	Nanofillers for structural enhancement, anti bio-fouling and corrosion resistant coatings.	Thermal barrier materials for engines.	Fuel cells, embedded sensors.	Cloaking for warships.
Intelligent transport	Automotive	Nanofillers for structural enhancement, fuel additives, scratch proof & anti-glare fogging coatings.	Thermal barrier materials for engines.	Shape memory alloys, fuel cells.	Smart tyres.

Tabela 5 – Produtos brasileiros desenvolvidos com nanotecnologia.

Fonte: (ABDI e CGEE, 2010)

Produto	Empresa	Descrição	Aplicação
Língua Eletrônica	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Sensor gustativo.	Avalia a qualidade de líquidos e identifica sabores.
Grafite	Faber Castell	Lápis com nanopartículas organometálicas adicionadas.	Mais resistência, maciez e intensidade de cor.
n-Domp	Ponto Quântico	Dosímetro de raios UV.	São três camadas de filmes finos: - A primeira guarda as informações da dose de UV; - A segunda permite a leitura da dose; e - A terceira bloqueia interações com água.
Biphor	Bunge	Tinta branca com nanopartículas de fosfato amorfo de alumínio.	Substitui o dióxido de titânio, que é tóxico, sendo não tóxico, mais barato e dando maior durabilidade.
Prótese Arterial	Nano Endoluminal	Endoprótese para cirurgia aórtica.	Sistema nanoestruturado que diminui o tempo de internação dos pacientes.
True Life Silpure	Diklatex	Nanopartículas de prata aderidas ao tecido.	Evita o mau odor, a descoloração do tecido e manchas.
Secador de cabelos	Nanox/TAIFF	Primeiro secador de cabelo desenvolvido à base de nanotecnologia.	Nanopartículas de titânio que eliminam bactérias e fungos do ar.
Sistema de liberação controlada de drogas	Nanocore	Nanocápsulas.	Menores concentrações e toxicidade; maior efetividade da droga; efeito terapêutico local.
Taubarez T 940	Indústrias Químicas de Taubaté	Dispersão aquosa aniônica de copolímero de estireno butadieno carboxilado.	Utilizado como um polímero barreira em cartões e papel (embalagens), para água e óleo.
Revestimentos	Nanox Tecnologia S.A.	Revestimentos nanoestruturados.	Resistência a altas temperaturas, corrosão, contaminação biológica, água, produtos químicos. Aumentam em 100% a vida útil do equipamento. Aplicação no setor petroquímico, farmacêutico, automobilístico e da construção civil.
Vitactive nanoserum antissinais	O Boticário	Nanocosmético.	Possui sistema de "liberação direcionada" dos ingredientes ativos nas camadas da pele: Comucel (complexo antienvhecimento); PrioX-in (complexo antioxidante); Lumiskin® (clareador e atenuador de olheiras) e vitaminas A, C e K.
CVdntus	CVD	Ponta odontológica ultrassônica constituída de uma pedra única de diamante depositada por CVD.	Alta durabilidade; silencioso, indolor, preciso; ausência de sangramento (não corta tecido mole); não agressivo ao meio ambiente.
Nanocompósitos de polipropileno e polietileno	Braskem	Nanocompósitos.	Aplicação no setor de embalagens, automobilístico, engrenagens, máquinas e equipamentos, eletroeletrônicos, eletrodomésticos etc.; Maior durabilidade, resistência ao calor, impermeabilidade à umidade e óleo.

5 Discussão

O breve panorama tecnológico descrito nas seções anteriores serve como ponto de partida para uma reflexão sobre seus impactos na indústria sob as óticas econômica e de políticas públicas.

A abordagem descritiva deste texto foi marcada por uma visão mais tecnológica. Com esse viés, a maneira mais convencional de abordar as consequências dos desenvolvimentos descritos na indústria brasileira seria partir das competências existentes e avaliar como essas tecnologias estão sendo absorvidas e apropriadas pelas empresas.

Esse enfoque, do tipo “*technology push*”, parte das capacitações existentes no país, principalmente no meio acadêmico, e procura analisar as lacunas empresariais para absorver tecnologia, a disponibilidade de recursos humanos qualificados e o que pode ser acentuado nos mecanismos de promoção da inovação tecnológica para alterar o patamar de domínio tecnológico da indústria.

A citada IBN (ver nota de rodapé nº 29) é um exemplo da ação do poder público em resposta a um diagnóstico baseado nesse enfoque. O objetivo da IBN é (*in verbis*):

“(...) integrar e fortalecer as ações governamentais para promover o aumento da competitividade da indústria brasileira ancorada na nanotecnologia. Trata-se de um projeto de Estado que pretende transformar o Brasil em um país cientificamente, tecnologicamente e economicamente competitivo em nível mundial no que diz respeito à geração e utilização da nanotecnologia como um dos principais motores do desenvolvimento econômico e social”.

A SisNANO³¹, uma rede de 26 laboratórios de universidades e institutos de pesquisa, estruturada a partir de uma chamada pública, oferece serviços e recursos para pesquisa e desenvolvimento a outros usuários, sejam eles do meio acadêmico, sejam eles de empresas. Além da promoção de eventos, a IBN oferece um canal de comunicação via web para facilitar a interação entre a empresa, e “*uma equipe técnica da Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia está preparada para aproximar empresas de pesquisadores, sempre prezando pelo sigilo das informações*”.

Ainda há poucos estudos sistemáticos sobre o impacto da nanotecnologia. O IBGE introduziu na última PINTEC questões específicas sobre o uso de nanotecnologia e biotecnologia. Segundo a PINTEC 2011 (IBGE, 2013), 1.132 empresas declararam ter realizado alguma atividade relacionada ao uso, produção e pesquisa e desenvolvimento em nanotecnologia, sendo que 86,1% delas foram inovadoras. Na indústria, 2,3% das empresas inovadoras realizaram atividades em nanotecnologia³². Cabe ressaltar que a

³¹ <http://nano.mct.gov.br/sisnano/sobre-o-sisnano/>

³² <http://saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias?idnoticia=2534&t=pintec-2011-empresas-industriais-gastam-mais-pesquisa-desenvolvimento-que-2008&view=noticia>

metodologia do IBGE dividiu as empresas que usam nanotecnologia em quatro categorias³³:

- 1) *Usuário final - compreende a simples compra ou aquisição de produto acabado que emprega nanotecnologia;*
- 2) *Usuário integrador - refere-se à compra de insumos ou processos nanotecnológicos para incorporar aos bens e serviços produzidos pelas empresas;*
- 3) *Produtor de insumos, produtos ou processos nanotecnológicos - compreende a produção ou desenvolvimento da técnica de incorporação de insumos, produtos ou processos nanotecnológicos; e*
- 4) *Pesquisa e desenvolvimento de produtos, insumos ou processos nanotecnológicos - compreende o estudo (pesquisa básica ou aplicada) ou desenvolvimento (desenvolvimento experimental) de técnicas de nanotecnologia. O mesmo se aplica quando a empresa tem sua própria linha de P&D ou tem parceria com Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs) para P&D de produtos, insumos ou processos nanotecnológicos.*

Ou seja, as categorias são adequadas, mas ainda há muito a investigar para a apreciação da penetração da nanotecnologia hoje no Brasil e o potencial futuro. A PINTEC 2011 foi publicada há poucos meses. É necessário um estudo mais detalhado para extrair informações mais significativas sobre os resultados do levantamento e se ter um primeiro quadro do impacto da nanotecnologia nas empresas.

Contudo, se olharmos para o panorama econômico propriamente dito, existem poucos números disponíveis para se desenhar um quadro mais nítido do impacto da nanotecnologia na indústria até aqui e fazer uma reflexão consequente sobre a adequação das políticas públicas na área. É necessário levantar indicadores relevantes específicos sobre faturamento com produtos nanotecnológicos, participação desses produtos no mercado brasileiro o Brasil e no mundo, peso desses produtos no portfólio das empresas, setores predominantes empregos gerados, qualificação de pessoal, origem da tecnologia, participação em redes de P&D e outros.

A PINTEC mapeou um universo muito maior de empresas do que aquele levantado pela FIRJAN (FIRJAN - DIMA, 2011). Porém, falta um estudo mais criterioso para que se tenha uma clara noção do panorama brasileiro de nanotecnologia.

Um estudo criterioso também é necessário para uma apreciação adequada de como a indústria brasileira tem se aproveitado do novo ciclo de desenvolvimento tecnológico de materiais. Como já foi comentado na seção 4.2.3, o estudo do CGEE é desigual no tratamento dos tópicos. Além disso, o enfoque tende para o *technology push* em vez do *market pull*. Em matéria publicada no jornal Valor Econômico há cerca de dois anos, dois jornalistas (DEZEM & LAGUNA, 2012) abordam a busca por novos materiais por parte de diferentes setores econômicos, pressionados por exigências regulatórias e preferências de consumidores, fazendo surgir o que eles denominam “*novas cadeias de*

³³ PINTEC 2011 – Notas Técnicas (IBGE, 2013)

materiais no país". Matérias-primas mais leves e resistentes, como polímeros e plásticos especiais, compósitos e metais leves, têm levado a indústria a substituir madeira, borracha, ferro fundido em seus produtos finais. Os setores escolhidos como exemplo são os da construção civil e automobilístico. Infelizmente, a matéria não traz nenhuma informação quantitativa nem abrange outros setores da indústria manufatureira.

Especificamente sobre materiais compósitos, a Associação Latinoamericana de Materiais Compósitos (ALMACO) divulgou em março de 2014 que o faturamento do setor brasileiro de materiais compósitos foi de R\$ 3,250 bilhões em 2013, 9% superior do que o faturamento de 2012³⁴. Em volume, foram processadas 210.000 toneladas de 2013, 1,7% superior ao registrado em 2012. Os mercados que mais cresceram foram o da energia eólica, agrícola e construção civil. Outros setores, como é caso do segmento de transporte pesado, não tiveram o crescimento esperado. Os resultados foram levantados por uma empresa de consultoria por encomenda da ALMACO.

A disponibilidade de informações consolidadas é ainda mais problemática no segmento de fabricação aditiva. Tanto quanto é de nosso conhecimento, essa área ainda não foi contemplada por uma associação de cunho industrial que possa exercer uma função de "inteligência de mercado" pelo lado da demanda.

Sobre a penetração das TICs na indústria manufatureira, além das dificuldades naturais para a obtenção de informações úteis pelo lado da demanda, existe também o fato das TICs permearem vários departamentos industriais, da produção à gestão financeira. Assim, existe mais um nível de dados entremeados cuja separação para diagnósticos corretos pode ser complicada: um sistema para modelagem computacional de um processo fabril pode ter sido computado como investimento em TI, por exemplo; ou um equipamento para prototipagem rápida pode não ter sido contado como nova tecnologia de produção, nem seu impacto mensurado.

Informações esparsas ou inexistentes, como exemplificado, sugerem uma carência de estudos consolidados e analíticos que possam servir de base não apenas para trabalhos acadêmicos que permitam obter retratos mais acurados da realidade da indústria brasileira. Levantamentos como o da ALMACO, citado acima, são reservados, de propriedade das associações e empresas de cada setor e costumam apresentar uma visão restrita. Falta uma articulação entre trabalhos como o do CGEE, mais voltado para grandes estratégias, e estudos de associações setoriais, voltados para a demanda real, com números e dados qualitativos para que se possa avaliar a importância de um dado segmento, como o de matérias, e o grau de esforço e o foco que são necessários para uma política de governo eficaz.

Cabe aqui um desafio metodológico: tradicionalmente, o recorte de estudos sobre a indústria costuma ser vertical, pela análise de setores. Contudo, esse recorte parece ser insuficiente: as tecnologias descritas neste texto têm uma natureza bastante horizontal, permeando setores os mais variados. Em alguns casos, elas podem transformar esses setores verticais, atualizando-os; em outros, podem modificar o panorama geral, fazendo surgir novas verticais, mais importantes, e deslocando setores tradicionais para uma

³⁴ Ver <http://www.almaco.org.br/imprensa.cfm?ID=101>

posição de menor relevância. A avaliação do impacto de cada uma dessas tecnologias na indústria manufatureira do Brasil precisará ser feito de um modo sistêmico, observando-se a sua própria dinâmica e a relação dela com as demais tecnologias habilitadoras para, daí, repensar como esse processo irá afetar o processo de cada setor vertical.

6 Conclusão

A seguir, à guisa de conclusão, são propostas algumas questões que podem servir para discussão e estudos mais aprofundados a partir da apresentação feita no texto. As questões escolhidas refletem o viés do autor do presente texto. Certamente, outras perguntas podem ser derivadas a partir da pequena seleção aqui apresentada, bem como outras surgirão à medida que se desenvolva a discussão.

- 1) Tendências gerais da indústria pela perspectiva tecnológica e o papel das TICs
 - Em que grau as grandes tendências gerais apresentadas na seção 2 ocorrem na indústria brasileira? É possível estabelecer uma comparação internacional?
 - A indústria brasileira tem incorporado ferramentas de TICs, especialmente de modelagem e simulação computacional na manufatura?
 - Essa incorporação se dá (ou deveria se dar) em setores específicos ou em todos os setores?
 - Como esses fatores afetam as decisões empresariais relativas à localização fabril e à gestão de fornecedores?
 - As TICs poderão, de fato, levar a mudanças mais radicais de paradigma, como por exemplo, surgimento de um significativo papel da indústria orientada a serviço?
 - A noção de “manufatura sustentável” tem se manifestado no Brasil? De que forma?
 - Há necessidade de instrumentos de política pública para promover a modernização tecnológica industrial genérica (“horizontal”) da manufatura brasileira?
- 2) Tecnologias habilitadoras: geral
 - O Brasil deve direcionar esforços de capacitação em todas as tecnologias habilitadoras descritas na seção 3.3 (vide Tabela 1) ou, ao contrário, deve buscar certo nível de especialização?
 - Considerando que cada tecnologia-chave apresenta diferentes níveis de “prontidão tecnológica” (Apêndice 1 – *Technology Readiness Level*), qual a estratégia ou estratégias recomendáveis para evitar que o Brasil caia na situação de busca contínua pelo *catch up*?
 - Como relacionar os níveis de prontidão tecnológica com as categorias empregadas pelo IBGE na PINTEC 2011 para classificar as empresas que usam nanotecnologia?
- 3) Tecnologias habilitadoras: fabricação aditiva
 - A fabricação aditiva (seção 4.1) costuma ser apresentada como uma tecnologia extremamente impactante, senão mesmo disruptiva. Ainda que se reconheçam os problemas de estudos prospectivos, é possível fazer, no momento, uma avaliação isenta do seu potencial real? Quais os limites de sua aplicação?
 - Nesse exercício, é possível estimar o impacto da fabricação aditiva especificamente na reconfiguração de algumas cadeias de fornecimento industrial?
 - Dentre os setores industriais brasileiros (verticais), quais poderiam ser os mais impactados pela fabricação aditiva?

- Qual é a penetração dessa tecnologia no Brasil hoje? Como tem se dado essa penetração: em que setores? Em empresas de que porte? Quais as forças que têm impulsionado essa adoção?
- 4) Tecnologias habilitadoras: materiais
- Setores tradicionais na indústria brasileira, como o metal-mecânico, têm incorporado tecnologias como a “engenharia de materiais computacional integrada” (seção 4.2)? Em caso afirmativo, ocorreram ganhos em termos de inovação e produtividade? Em caso negativo, quais as explicações para a não-incorporação dessas tecnologias?
 - Setores em que o poder de compra estatal é mais significativo, como energia, transportes e saúde, têm sido fomentados a incorporar novas tecnologias de materiais?
- 5) Tecnologias habilitadoras: nanotecnologia
- Setores em que o poder de compra estatal é mais significativo, como energia, transportes e saúde, têm sido fomentados a incorporar nanotecnologia?
- 6) Diagnósticos e políticas
- É possível criar um recorte horizontal que permita estudar essas tecnologias dentro de sua própria dinâmica e, a partir daí, avaliar o impacto sobre os setores dos recortes tradicionais (recortes verticais)?
 - Os instrumentos de política industrial e de fomento à inovação que vêm sendo utilizados pelo Brasil são os mais adequados para lidar com as questões levantadas pelas novas tecnologias? Ou, de outra forma, qual a melhor maneira de utilizar esses instrumentos para que a indústria brasileira ganhe ou mantenha competitividade?

Bibliografia

- ABDI e CGEE, 2010. *Panorama Nanotecnologia - Série Cadernos da Indústria ABDI volume XIX*, Brasília: ABDI.
- APPELIAN, D., 2007. Looking beyond the last 50 years: the future of Materials Science and Engineering. *JOM*, Issue February 2007, pp. 65-73.
- BOURREL, D. L., BEAMAN, J. J., LEU, M. C. & ROSEN, D. W., 2009. *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead*. Istanbul, Turkey, RapidTech 2009: US-TURKEY Workshop on Rapid Technologies.
- BOURREL, D. L., LEU, M. C. & ROSEN, D. W., 2009. *Roadmap for Additive Manufacturing - Identifying the Future of Freeform Processing*, Austin, TX. : The University of Texas at Austin - Laboratory for Freeform Fabrication - Advanced Manufacturing Center.
- CGEE, 2010. *Materiais avançados no Brasil 2010-2022*, Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.
- DEZEM, V. & LAGUNA, E., 2012. Produção em grande escala justifica busca por novos materiais. *Valor Econômico*, 07 maio, p. B1.
- DIISRTE, 2012. *Enabling technology futures: a survey of the Australian technology landscape - Executive Report*, Canberra, Australia: Department of Industry, Innovation, Science, Research and Tertiary Education.
- EC, 2009. *Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies - Current situation of key enabling technologies in Europe*. Brussels: European Commission.
- E-MRS, 2011. *Materials for Key Enabling Technologies*, Strasbourg, Fr.: E-MRS.
- FIRJAN - DIMA, 2011. *Nanotecnologia e a competitividade da indústria brasileira*, Rio de Janeiro: FIRJAN.
- GERSHENFELD, N., 2012. How to make almost anything. *Foreign Affairs*, 27 Sept.92(6).
- GODIN, B., 2008. *Innovation: The History of a Category*, Montreal: INRS.
- GORDON, R., 2014. *The Demise of U.S. Economic Growth: Restatement, Rebuttal and Reflections*. NBER Working Paper 19895. Cambridge, MA: NBER.
- GO-SCIENCE, 2010. *Technology and Innovation Futures: UK Growth Opportunities for the 2020s*, London: Department for Business, Innovation and Skills.
- HLEG-KETS, 2010. *Thematic Report by the Working Team on Advanced Manufacturing Systems*, Bruxelas: Comissão Europeia.
- HLEG-KETS, 2011. *Key Enabling Technologies - Final Report*, Brussels: European Commission.
- IBGE, 2013. *Pesquisa de Inovação 2011*, Rio de Janeiro: IBGE.
- IDA, 2012. *Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing*, Alexandria, VA.: IDA.

- IRGC, 2006. *Nanotechnology Risk Governance*, Geneva: The International Risk Governance Council.
- KADANOFF, L., 2004. Excellence in computer simulation. *Computing in Science & Engineering*, 6(2), pp. 57-67.
- KUPFER, D., 2010. Focos para a política tecnológica brasileira. *Valor Econômico*, 07 Abril.
- LIND, M. & FREEDMAN, J., 2012. *Value Added: America's Manufacturing Future*, Washington, DC: New America Foundation.
- McGRATH, M. E., 1995. *Product strategy for high-technology companies*. Homewwod, Il.: Irwin.
- MCTI, 2012. *Estratpégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012 - 2015*, Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e e Inovação.
- MEHRABI, M. G., ULSOY, A. G. & KOREN, Y., 2000. Recon@urable manufacturing systems: Key to future manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Volume 11, pp. 403-419.
- MINI-IGT, 2010. *Nanotechnology: a UK Industry View*, Swindon, UK: The Technology Strategy Board.
- NRC, 2008. *Integrated Computational Materials Engineering - A transformative discipline for improved competitiveness and national security*, Washington, DC: NAP.
- NSTC, 2012. *A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing*, Washington, DC: Executive Office of the President of The US.
- OECD, 2005. *Oslo Manual - Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data (tradução Finep)*. 3rd. ed. Paris: OECD.
- ROBERTSON, D. & ULRICH, K., 1998. Planning for Product Platforms. *Sloan Management Review*, Summer, 34(4), pp. 19-32.
- ROYAL SOCIETY, 2004. *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, London, UK: The Royal Society.
- SMLC, 2011. *Implementing 21st Century Smart Manufacturing - Workshop Summary Report*, Washington, DC: SMLC.
- TASSEY, G., 2004. Policy Issues for R&D Investment in a Knowledge-Based Economy. *Journal of Technology Transfer*, Volume 29, pp. 153-185.
- TASSEY, G., 2008. Modeling and Measuring the Economic Roles of Technology Infrastructure. *Economics of Innovation and New Technology*, 17(7), pp. 617-631.
- TASSEY, G., 2009. *The Technology Imperative and The Future of R&D Policy*. [Online] Available at: http://www.nist.gov/director/planning/policy_studies.cfm [Acesso em 05 Fev 2013].
- TEECE, D. J., 1986. Profiting from technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy. *Research Policy*, Volume 15, pp. 285-305.
- TSB, 2009. *Nanoscale Technologies - Strategy 2009-2012*, Swindon, UK: The Technology Strategy Board.

- UNIDO, 2013. *Emerging trends in in global manufacturing industries*, Vienna: United Nations Industrial Development Organization.
- van VUUREN, W. & HALMAN, J. I., 2001. *Platform-driven product families: linking theory with practice*. Eindhoven, Conference "The Future of Innovation Studies".
- VOLPATO, N. & COSTA, C. A., 2013. *Competências e recursos da Rede de Manufatura Aditiva (RMA) no Brasil*. Itatiaia, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânica, 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.
- WEF , 2012. *The Future of Manufacturing -Opportunities to drive economic growth*, Genebra, Suíça: WEF.
- WIENDAHL, H.-P.et al., 2007. Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2), pp. 783-809.
- XU, X., 2012. From cloud computing to cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 28, pp. 75-86.

Siglas

- ABDI: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (Brasil)
- CGEE: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (Brasil)
- DIISRTE: *Department of Industry, Innovation, Science, Research and Tertiary Education* (Australia)
- EC: *European Comission*
- GO-SCIENCE: *The Government Office for Science* (Reino Unido)
- HLEG – KETS: *High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies* (grupo de trabalho da Comissão Europeia)
- IBN: Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia
- IDA: *Institute for Defense Analyses*
- NBER: *National Bureau of Economic Research* (EUA)
- NRC: *National Research Council* (EUA)
- NSTC: *National Science and Technology Council* (EUA)
- OECD: *Organization for Economic Cooperation and Development* (em português, OCDE)
- PCB: *Printed Circuit Boards*
- SMLC: *Smart Manufacturing Leadership Coalition* (EUA)
- UNIDO: *United Nations Industrial Development Organization*
- WEF: *World Economic Forum*

Apêndice 1 – *Technology Readiness Level*

O nível de maturidade ou prontidão de uma tecnologia pode ser classificado por uma escala designada em inglês como *Technology Readiness Level*, ou TRL. Essa escala foi introduzida pela NASA e posteriormente adotada com as necessárias modificações pelo Departamento de Defesa dos EUA e por outras agências (um sumário simples e eficaz sobre as escalas de TRL pode ser encontrado no verbete da Wikipedia em inglês, http://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level).

Neste trabalho a escala mais adequada ao contexto é a aquela empregada pelo Departamento de Energia dos EUA e reproduzida a seguir no original em inglês:

Tabela 6 - Níveis de prontidão ou maturidade tecnológica, TRL

Nível	Descrição
TRL 1	<i>Scientific research begins translation to applied R&D - Lowest level of technology readiness. Scientific research begins to be translated into applied research and development. Examples might include paper studies of a technology's basic properties.</i>
TRL 2	<i>Invention begins - Once basic principles are observed, practical applications can be invented. Applications are speculative and there may be no proof or detailed analysis to support the assumptions. Examples are limited to analytic studies.</i>
TRL 3	<i>Active R&D is initiated - Active research and development is initiated. This includes analytical studies and laboratory studies to physically validate analytical predictions of separate elements of the technology. Examples include components that are not yet integrated or representative.</i>
TRL 4	<i>Basic technological components are integrated - Basic technological components are integrated to establish that the pieces will work together.</i>
TRL 5	<i>Fidelity of breadboard technology improves significantly - The basic technological components are integrated with reasonably realistic supporting elements so it can be tested in a simulated environment. Examples include "high fidelity" laboratory integration of components.</i>
TRL 6	<i>Model/prototype is tested in relevant environment - Representative model or prototype system, which is well beyond that of TRL 5, is tested in a relevant environment. Represents a major step up in a technology's demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a high-fidelity laboratory environment or in simulated operational environment.</i>
TRL 7	<i>Prototype near or at planned operational system - Represents a major step up from TRL 6, requiring demonstration of an actual system prototype in an operational environment.</i>
TRL 8	<i>Technology is proven to work - Actual technology completed and qualified through test and demonstration.</i>
TRL 9	<i>Actual application of technology is in its final form - Technology proven through successful operations.</i>