

2

Nanotecnologia: conceituação e emergência do paradigma tecno-científico

Este capítulo apresenta inicialmente os conceitos e definições básicas de nanotecnologia e dos principais componentes de sua cadeia de valor. Traça um breve histórico do desenvolvimento da nanotecnologia, seus marcos históricos. Em seguida, discute os benefícios e riscos potenciais do desenvolvimento das aplicações baseadas em nanotecnologia, particularmente os riscos à saúde humana e animal, à segurança e ao meio ambiente. Na seqüência, busca demonstrar a emergência do paradigma tecno-científico da nanotecnologia, por meio de informações quantitativas sobre a produção científica, propriedade intelectual, investimentos, estudos e iniciativas em nanometrologia, normalização e regulação.

2.1. Conceituação

A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) ressalta, em documento publicado em 2006, que a enorme expectativa criada sobre os avanços da nanotecnologia tem gerado muita controvérsia e intenso debate em relação a definições objetivas sobre nanociência e nanotecnologia (N&N) (Unesco, 2006). Objetiva-se, nesta seção, apresentar definições e conceitos básicos referentes à N&N, baseando-se em obras de referência sobre o tema.

2.1.1. Conceitos básicos

De acordo com a The Royal Society e a The Royal Academy of Engineering (2004), nanotecnologia é “um nome genérico que representa todas as tecnologias que envolvem o projeto, caracterização, produção e aplicação de estruturas, instrumentos e sistemas pelo controle de suas formas e tamanhos em escala nano” (The Royal Society/ The Royal Academy of Engineering, 2004, p.23).

Joseph e Morrison (2006, p.16) conceituam nanotecnologia como: “a aplicação da nanociência, compreendendo a manipulação dos átomos, moléculas ou grupos de moléculas de forma individual, para geração e desenvolvimento de materiais e dispositivos novos com vastas e diferentes propriedades”.

Conforme definida pela National Nanotechnology Initiative (NNI), dos EUA, nanotecnologia é “a compreensão e o controle da matéria em dimensões entre 1 e 100 nanômetros, aproximadamente; permitindo-se a criação e utilização de estruturas, aparelhos e sistemas que estejam revestidos de novas propriedades e funções. Ainda segundo o documento da NNI, nanotecnologia permeia diversos campos (Ciência, Engenharia e Tecnologia) e abrange a mensuração, modelagem, manipulação e representação da matéria em nanoescala” (National Nanotechnology Initiative, 2010).

Segundo o National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), nanotecnologia é “um sistema de métodos inovadores para manipular a matéria em escala próxima à atômica, para produzir novos materiais, estruturas e dispositivos” (NIOSH, 2009, p.3).

Dentre inúmeros conceitos de nanotecnologia existentes, destacam-se os do Comitê Técnico ISO 229, que a define como: (i) compreensão e controle da matéria e processos em escala nanométrica, em geral – mas não exclusivamente – abaixo de 100 nanômetros em uma ou mais dimensões, em que o aparecimento de fenômenos ligados ao tamanho geralmente permite novas aplicações; e (ii) utilização de propriedades dos materiais em nanoescala, a qual difere da escala dos átomos, das moléculas e da matéria a granel, para a criação de melhores materiais, dispositivos e sistemas que exploram estas novas propriedades.

Um enfoque de interesse para esta pesquisa refere-se à diferença entre as nanotecnologias evolucionárias e revolucionárias. As primeiras possibilitam um aprimoramento em escala nanométrica de produtos ou processos já existentes, enquanto as chamadas nanotecnologias revolucionárias visam à manipulação da matéria nessa escala com propósitos totalmente inéditos (Galembeck, 2003).

Não obstante a forte convergência observada entre as definições apresentadas até o momento, o documento da Unesco (2006) traz à discussão a existência, em nível mundial, de diferentes conceitos e definições que variam de acordo com vieses de interesse dos respectivos países e atores. Cita exemplos dos países orientais, como China, Coréia e Japão, que abordam o tema com ênfase em materiais, principalmente em suas aplicações no setor de eletrônicos,

enquanto os países da África e alguns da América Latina preferem enfatizar nanomateriais aplicados nos campos da Medicina e das Ciências Ambientais.

Para fins da presente dissertação, adota-se a definição para nanotecnologia apresentada na caixa de texto, a seguir, complementada pelo esquema didático de nanoescala, elaborado pela Unesco, conforme Figura 2.1.

Nanotecnologia é um nome genérico que representa todas as tecnologias que envolvem o projeto, a caracterização, a produção e a aplicação de estruturas, instrumentos e sistemas pelo controle de suas formas e tamanhos em escala nano (The Royal Society/ The Royal Academy of Engineering, 2004, p.23).

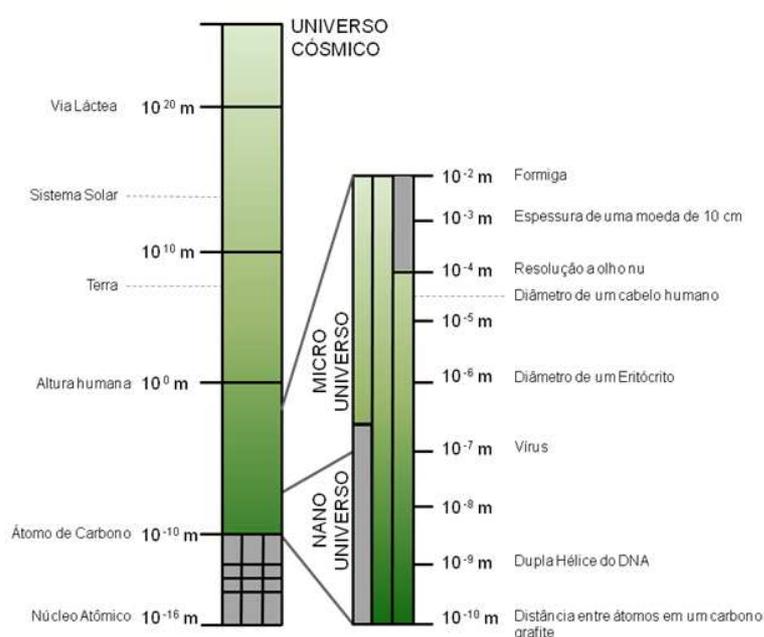


Figura 2.1 – Representação da nanoescala

Fonte: Unesco, 2006.

2.1.2. Manufatura em nanoescala

Existe uma grande variedade de técnicas de manufatura em nanoescala que são comumente divididas em duas abordagens principais: (i) *top-down*; e (ii) *bottom-up*. A Figura 2.2 representa esquematicamente as técnicas de manufatura em nanoescala, classificadas segundo as referidas abordagens.

A abordagem *top-down* é a mais tradicional no desenvolvimento de nanoestruturas e tem por objetivo reproduzir algo já existente, porém em escala menor que a original. Ou seja, visa trabalhar a matéria-prima de forma a remover o excesso e alcançar a nanoestrutura desejada, logrando fabricar produtos com maior capacidade de processamento de informações e isso tem sido realizado

mediante duas rotas: a engenharia de precisão e a litografia. Tanto a engenharia de precisão quanto a litografia têm sido bastante melhoradas e aprimoradas graças à evolução da indústria dos semicondutores.

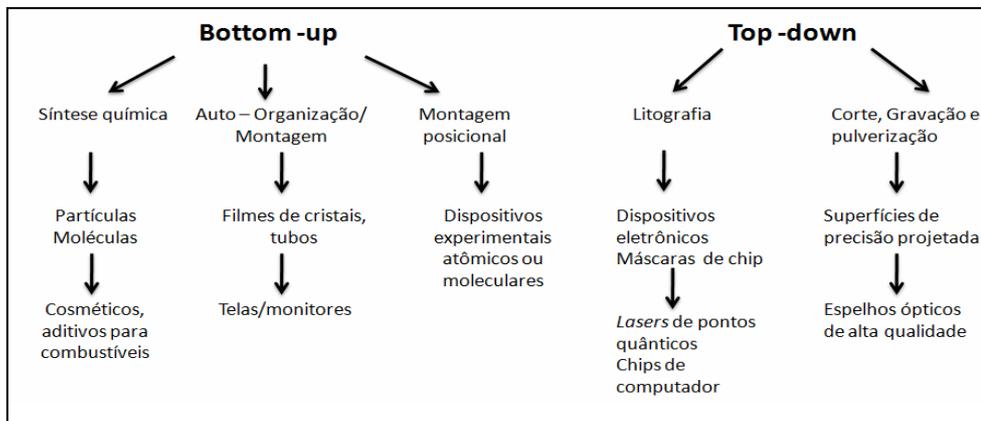


Figura 2.2 – Métodos de fabricação em nanoescala: *top-down* e *bottom-up*

Fonte: The Royal Society/The Royal Academy of Engineering (2004)

A engenharia de precisão, de uma forma geral, está ligada à indústria da microeletrônica, desde a produção de *wafers* (lâminas de silício, utilizadas em semicondutores), de planos de semicondutores utilizados como substratos para *chips* de computadores, passando pelo processo mecânico de posicionamento dos *wafers*, até a fabricação do sistema óptico de precisão utilizado para imprimir os padrões nos mesmos.

Além disso, a engenharia de precisão é também usada em uma variada gama de produtos, tais como discos rígidos de computador e leitores de CD e DVD. Atualmente as ferramentas de máquinas de alta precisão conseguem ter um excelente desempenho, quer em termos de precisão ou definição das formas, quer em termos de acabamentos das superfícies. Contudo a escala continua a ser uma limitação, pois a engenharia de precisão é um processo clássico e não leva em conta as interações de natureza quântica observadas na escala nanométrica.

A segunda rota segundo a abordagem *top-down* – a litografia – é considerada uma das principais tecnologias associadas à fabricação de semicondutores e consiste em um processo de gravação de padrões em materiais.

Derivado do grego, o termo litografia significa, literalmente, “escrever na pedra”. Esse termo tem sido utilizado no contexto do desenvolvimento da nanotecnologia para se referir a técnicas de ataque químico, escrita ou

impressão em nível microscópico, em que as dimensões dos caracteres situam-se na casa dos nanômetros. Exemplos dessa técnica em escala nanométrica são: (i) litografia por feixe de elétrons; e (ii) litografia por feixe de íons (Brasil, MCT, 2006).

A litografia convencional é um processo bastante antigo, entretanto quando se trata de posicionar átomos ou moléculas na superfície de uma forma precisa, podem surgir alguns problemas relacionados à natureza quântica dos mesmos. As técnicas desenvolvidas pela indústria microeletrônica possibilitaram a miniaturização de dispositivos mecânicos, dando origem ao seu estudo e investigação profunda. A tecnologia utilizada nos sistemas microelectromecânicos procura explorar e expandir as potencialidades da manufatura de circuitos integrados em silício, utilizada na fabricação de *chips* desde o processamento do sinal elétrico até a incorporação de sensores e atuadores nos *chips* utilizados para mover as várias partes mecânicas, o que futuramente poderá ser aplicado aos nano-robôs.

A segunda abordagem de manufatura em nanoescala é a chamada abordagem *bottom-up*, que consiste na criação de estruturas, átomo por átomo ou molécula por molécula. A grande variedade de linhas utilizadas, ao se adotar a essa abordagem, pode ser dividida em três principais categorias: (i) síntese química (*chemical synthesis*); (ii) auto-organização/auto-montagem (*self assembly*); e (iii) organização determinada (*positional assembly*).

Em geral, a síntese química é utilizada para produzir matérias-primas, nas quais são utilizadas moléculas ou partículas nano. O processo genérico, pelo qual as nanopartículas podem ser produzidas por síntese química, é mostrado na Figura 2.3, a seguir.

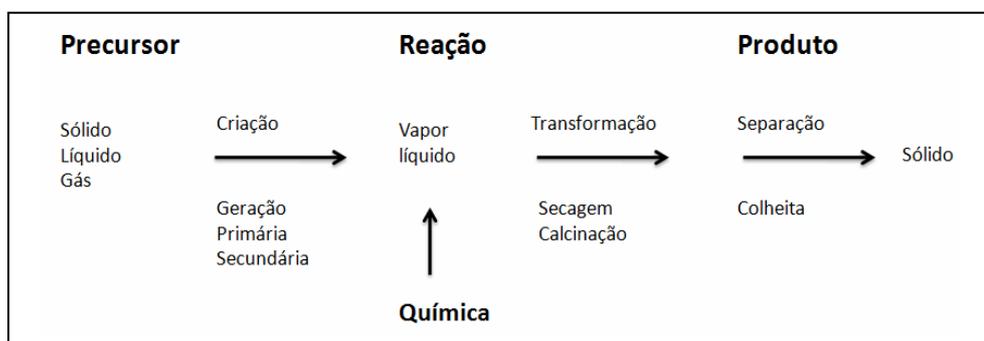


Figura 2.3 - Processo genérico de produção de nanopartículas

Fonte: The Royal Society/The Royal Academy of Engineering (2004).

Na segunda categoria de procedimentos – auto-organização/auto-montagem, os átomos ou moléculas organizam-se de forma autônoma, por meio de interações físicas ou químicas, construindo assim nanoestruturas ordenadas. A auto-organização/auto-montagem é onipresente na natureza. Os sistemas de auto-organização/montagem molecular situam-se na interface entre a biologia molecular, a química, a ciência de polímeros, a ciência de materiais e a engenharia. A formação de cristais de sal ou de flocos de neve são exemplos de auto-organização na natureza.

Já na organização determinada (*positional assembly*), os átomos e moléculas são deliberadamente manipulados e colocados em determinada ordem, um a um.

As abordagens *top-down* e *bottom-up* utilizadas na manufatura em nanoescala contemplam métodos complementares entre si. Qualquer desenvolvimento de nanotecnologia em algum momento necessita de métodos de uma ou outra abordagem. A convergência esperada das duas abordagens levará ao futuro da nanotecnologia, como será abordado a seguir.

2.1.3.

A convergência futura das abordagens *top-down* e *bottom-up*

Como visto no Item 2.1.2, os métodos da abordagem *top-down* permitem duas coisas fundamentais: (i) construir máquinas reais com ações similares às das máquinas maiores e familiares para todos; (ii) minituarizar as máquinas.

Além disso, esses métodos são os utilizados na indústria eletrônica para integrar componentes eletrônicos. A interface da nanotecnologia com o ser humano para muitas aplicações futuras, como sensores nanocomputadores, *chips* implantados e outras aplicações que venham a requerer um controle do tipo eletrônico ou “direcionamento” em algum momento, irá depender fundamentalmente da abordagem *top-down*.

A fronteira da abordagem *top-down* traduz-se em uma solução de compromisso entre o grau de esforço e a quantidade de recursos financeiros a serem alocados e as metas de precisão que se deseja alcançar para manipular a matéria em uma escala cada vez menor.

Por outro lado, os métodos *bottom-up* possibilitam a manipulação e a combinação das propriedades de um determinado material com propriedades moleculares, mediante uma combinação inteligente que permita situar os átomos adequados um ao lado do outro e manipular as propriedades do conjunto resultante. As limitações dos métodos *bottom-up* são relacionadas à

reprodutibilidade e à quantidade. Na seção seguinte, quando será abordada a cadeia de valor da nanotecnologia, serão descritos os diversos tipos de nanomateriais, sendo que a maior parte deles é fabricada hoje pelos métodos *bottom-up*.

Para compreender melhor a manipulação em escala atômica, torna-se necessário ter pelo menos um conhecimento inicial da matéria e dos processos para se chegar a ela.

A Figura 2.4 mostra o tamanho dos objetos passíveis de controle pelos métodos aqui descritos, ao longo do tempo. Seu autor destaca que nas últimas décadas, os engenheiros e cientistas oriundos da vertente “*top*” passaram a trabalhar com objetos em escalas cada vez menores, enquanto os químicos, físicos e biólogos, que vêm da vertente “*bottom*”, já começaram a trabalhar com objetos nanométricos cada vez maiores. Na perspectiva do encontro das duas comunidades, preconiza-se uma sinergia muito interessante entre as duas abordagens de manufatura que estimulará o desenvolvimento de uma maior variedade de nanomateriais e nanosistemas, integrando métodos de ambas as abordagens.

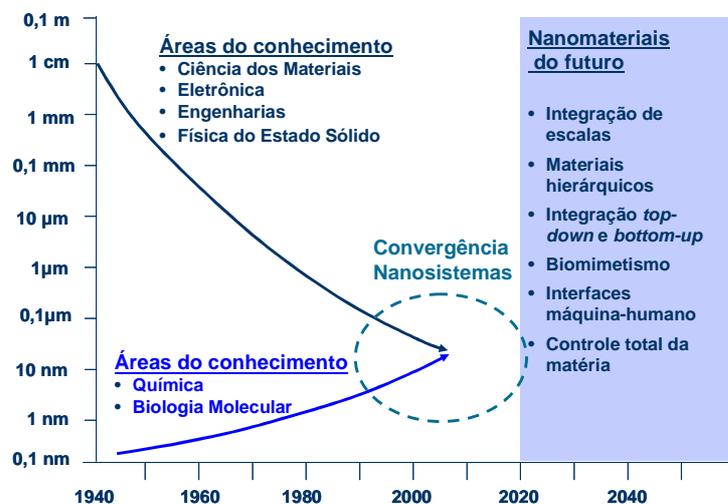


Figura 2.4 – Convergência das abordagens *top-down* e *bottom-up*

Fonte: Illia, 2009, p. 64.

Essa convergência, que já está acontecendo na presente década, promoverá o desenvolvimento da verdadeira nanotecnologia, na qual os componentes de um nanosistema integrado poderão ser fabricados pelo “método ótimo”, bem situados no espaço e manipulados à vontade. Um sistema integrado, no qual se poderá controlar e fabricar interfaces para os seres humanos e os computadores pela vertente “*top*” e desenhar nanomundos com

propriedades nanométricas e moleculares, pela vertente “*botton*”, como mostrado na Figura 2.4.

Com a convergência das duas abordagens, será possível combinar moléculas biologicamente interessantes, como por exemplo fragmentos de DNA, proteínas, anticorpos ou membranas celulares, com nanotubos, nanocabos e nanopartículas sob medida e conectá-los com o mundo exterior para ver como essas moléculas se comportarão, como se modificarão e quais serão suas novas propriedades.

2.1.4. Cadeia de valor da nanotecnologia

Conceitua-se a cadeia de valor da nanotecnologia em seus diversos estágios, de acordo com a abordagem da empresa de consultoria Lux Research Inc. (2004), que integra os conceitos de N&N aqui apresentados com a visão de negócios e de mercado. A Figura 2.5 representa esquematicamente a cadeia de valor da nanotecnologia, conforme a concepção da Lux Research Inc. (2004).

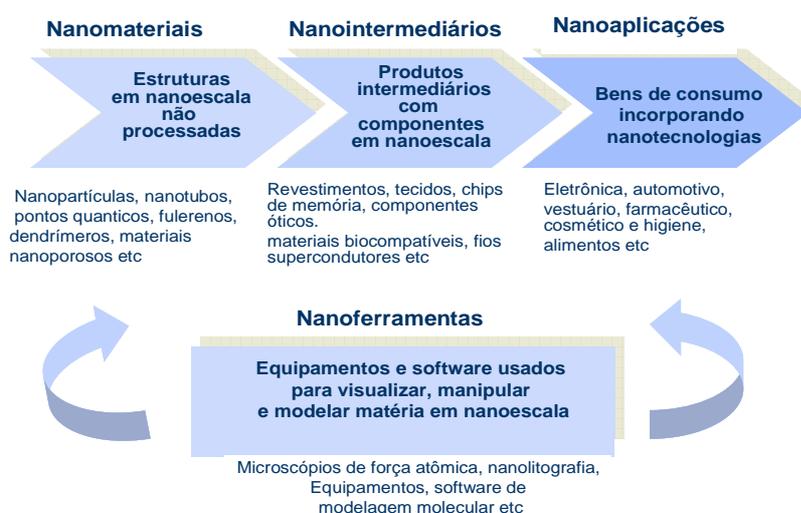


Figura 2.5 - Cadeia de valor da nanotecnologia

Fonte: Lux Research Inc. (2004).

De acordo com a Lux Research Inc., a nanotecnologia não constitui um setor industrial, como por exemplo a eletrônica e a indústria química, mas um conjunto de técnicas capaz de manipular a matéria na escala nanométrica. Essa característica na visão de negócios e de mercado faz com que se abordem as nanotecnologias de uma forma geral, sem diferenciar as diversas áreas de conhecimento que contribuiriam para o seu desenvolvimento.

Em contraponto, acredita-se que para se aprofundar a análise dos benefícios, vantagens, oportunidades, riscos e perigos das nanotecnologias, deve-se iniciar estudos e avaliações setoriais diferenciadas, segundo os processos que envolvem nanomateriais e nanopartículas e as nanoaplicações propriamente ditas.

Considerando-se que, em nanoescala, a constituição da matéria é comum a todas as ciências (biologia, física, química, dentre outras), a convergência tecnológica das chamadas tecnologias emergentes dificulta a sua classificação disciplinar e industrial. Do ponto de vista econômico, conforme a Lux Research Inc. (2004), diferenciam-se quatro estágios bem distintos na cadeia valor: (i) nanomateriais; (ii) nanointermediários; (iii) nanoaplicações; e (iv) nanoferramentas.

Os nanomateriais são estruturas de escala nano não transformadas ou transformadas de forma limitada para uso imediato, tais como nanopartículas, nanofios, nanotubos, pontos quânticos, os fulerenos, dendrímeros e materiais nanoporos.

Os nanointermediários situam-se na cadeia entre os nanomateriais e as nanoaplicações e são definidos como produtos intermediários com componentes em nanoescala necessários para obter outros bens. Exemplos de nanointermediários são tintas, revestimentos, têxteis, *chips* de memória, biomateriais ortopédicos e cabos supercondutores.

Já as chamadas nanoaplicações são bens que incorporam nanomateriais ou nanointermediários. A título de ilustração, citam-se protetores solares, vidros auto-limpantes, medicamentos, alimentos pré-cozidos, tecidos inteligentes, computadores e aparelhos eletrônicos.

No quarto e último estágio, situam-se as nanoferramentas, que são equipamentos e *software* para visualizar, manipular e dar forma à matéria em escala nanométrica. São exemplos de nanoferramentas, os microscópios de força atômica, equipamentos de impressão e aplicações para a modelagem molecular que podem contribuir tanto para a produção de nanomateriais, como de nanointermediários e nanoaplicações. Esse estágio da cadeia de valor é fundamental para as proposições que serão encaminhadas nesta dissertação em relação à metrologia, normalização e regulação de nanomateriais.

A Lux Research Inc. destaca ainda a questão da inovação tecnológica em nanotecnologia e explica que nem toda nanotecnologia pode ser considerada uma nova tecnologia. Paralelamente à descoberta de novas nanotecnologias, utilizam-se nanotecnologias conhecidas ou estabelecidas no mercado há anos,

como, por exemplo, as zeólitas sintéticas usadas como catalisadores em processos químicos.

Outro aspecto levantado pela Lux Research Inc. refere-se à rentabilidade dos produtos que incorporam nanotecnologias, sendo previsto por essa instituição que muitos deles serão rentáveis apenas marginalmente. A maioria dos nanomateriais poderão rapidamente se tornar *commodities*, com reduzidas margens de lucro, ao se comparar com especialidades e produtos de maior valor agregado. A rentabilidade da fabricação de nanointermediários e nanoaplicações poderá variar bastante, de acordo com as margens das categorias de produtos a jusante na cadeia.

Complementando as visões da cadeia de valor da Lux Research Inc. e a discussão sobre a convergência das abordagens *top-down* e *bottom-up* (Illia, 2009), apresentam-se as perspectivas futuras do desenvolvimento da nanotecnologia, segundo Bowman e Hodge (2006). Esses autores acreditam que uma "segunda geração" de nanotecnologia ocorrerá entre 2011 e 2020, conforme ilustra a Figura 2.6.



Figura 2.6 - Prospecção das aplicações de nanotecnologias: 1ª e 2ª gerações

Fonte: Bowman e Hodge (2006).

Embora represente uma continuação lógica das tendências atuais de convergência das abordagens *top-down* e *bottom-up*, o desenvolvimento dessa “segunda geração” poderá ser assumido como um caminho intermediário entre a atual “ciência ficção” e aquela mais futurística.

Segundo The Royal Society/The Royal Academy of Engineering (2004), a segunda geração preconizada por Bowman e Hodge (2006) acontecerá a partir da progressão da nanotecnologia básica, chegando ao desenvolvimento de

estruturas tecnológicas mais complexas em escala nanométrica, que transversalmente estariam presentes nos processos e produtos de um grande número de setores industriais, no médio prazo.

Isso posto, pode-se afirmar que haverá mudanças significativas nas tecnologias de produção e, como consequência, no consumo dos recursos e nos processos de fabricação, de uma forma geral. Este cenário torna pertinente a preocupação com os atuais sistemas de gerenciamento, dado que muitas das atividades com grande importância hoje tendem a ser menos importantes ou até mesmo desaparecer. As empresas dos mais diversos setores que serão impactados pelos avanços tecnológicos e comerciais da nanotecnologia deverão reavaliar suas posições estratégicas no âmbito das respectivas cadeias de valor.

2.2.

Breve histórico do desenvolvimento da nanotecnologia

O breve histórico aqui apresentado baseia-se no estudo desenvolvido pelo Instituto Inovação (Instituto Inovação, 2005).

Há mais de 2.500 anos, os gregos começaram a pensar que todas as coisas do mundo poderiam ser divididas em componentes mais simples. Dessa indagação, surgiu a palavra "átomo", que significa "indivisível", ou também, a menor parte da matéria.

Em 1807, Dalton elaborou um modelo atômico que retomava os antigos conceitos dos gregos; imaginando-os como uma pequena esfera, com massa definida e propriedades características. Desde então, a ciência conseguiu constatar que os átomos são formados por partículas subatômicas: compostas por um núcleo positivo, no qual reside praticamente toda sua massa; e por elétrons, que circulam em torno do seu núcleo. Logo, ao contrário da etimologia de seu nome, os átomos são divisíveis.

Os átomos são partículas minúsculas, impossíveis de serem vistas a olho nu, e medem menos de um centésimo de bilionésimo do metro. Para que pudessem ser vistas, foi necessária a criação de instrumentos especiais, como, por exemplo, microscópio eletrônico de varredura por tunelamento ou STM (*Scanning Tunneling Microscope*), inventado na década de 80. Esse equipamento, capaz de obter imagens numa escala atômica de 2×10^{-10} metros ou 0,2 nanômetros, é utilizado na manipulação individual de átomos.

Keiper (2003) afirma que o ponto de origem da nanotecnologia foi o trabalho "*There's Plenty of Room at the Bottom*", desenvolvido pelo físico Richard Feynman e apresentado no Encontro Anual da Sociedade Americana de

Física, em 29 de dezembro de 1959. Na ocasião, Feynman sugeriu que os átomos poderiam ser organizados, conforme a necessidade, desde que não houvesse violações às leis da natureza. A partir desse conceito, materiais com propriedades inteiramente novas poderiam ser criados. Essa palestra foi considerada o marco inicial da nanotecnologia, tendo despertado mais tarde o interesse da comunidade científica.

Até então, a palavra nanotecnologia não teve precedentes. Somente em 1974, o termo teria sido empregado pelo Prof. Norio Taniguchi, da Universidade de Tóquio, na tentativa de distinguir entre a engenharia utilizada em uma escala micro (10^{-6}) e aquela manipulada na escala nano (10^{-9}).

Todavia, as proposições levantadas por Feynman só começaram a se tornar realidade a partir da construção do microscópio eletrônico de varredura por tunelamento, em 1981.

Em meados dos anos 80, o conceito de nanotecnologia alcançou maior repercussão graças ao pesquisador Eric Drexler, por meio de seu livro *“Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology”*. Especialista em tecnologias emergentes e suas conseqüências para o futuro, Drexler tornou-se um nome emblemático e um dos principais responsáveis pela difusão das idéias em torno dos nanômetros (Keiper, 2003).

A Figura 2.7 ilustra graficamente os marcos históricos do desenvolvimento da nanotecnologia, em um horizonte temporal de 60 anos.

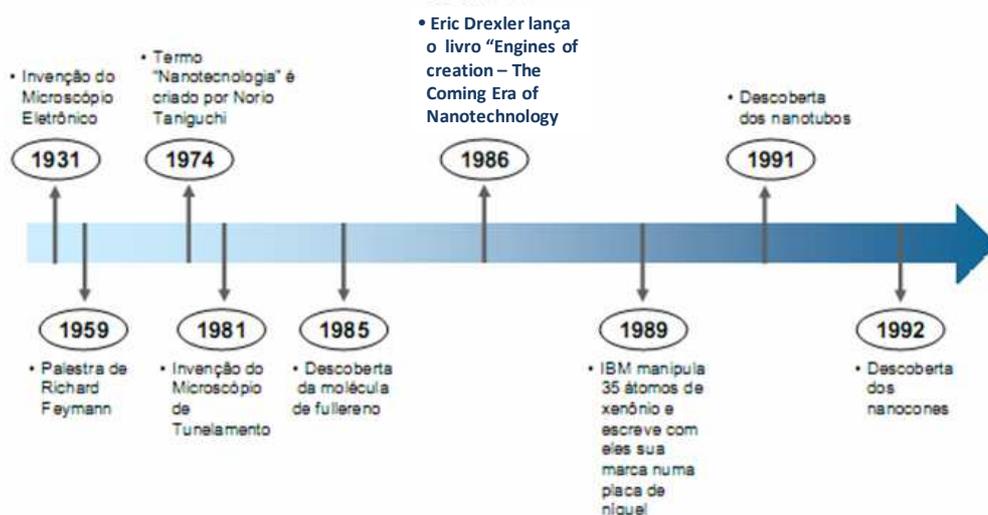


Figura 2.7 - Marcos históricos do desenvolvimento da nanotecnologia

Fonte: Instituto Inovação (2005).

Nas seções seguintes, complementa-se esta visão sintética da evolução da nanotecnologia em nível mundial, com a apresentação de indicadores

quantitativos da produção científica e da propriedade intelectual, cobrindo o período de 1989 a 2009 e com base em levantamento realizado diretamente nas bases de dados *Scopus* (para a produção científica) e *Derwent Innovation Index* (para a propriedade intelectual).

2.3. Benefícios da nanotecnologia

Nesta seção, busca-se mostrar que o desenvolvimento da nanotecnologia tem trazido uma ampla gama de benefícios para as ciências, assim como para o surgimento de inúmeras aplicações tecnológicas em diversos setores socioprodutivos. A síntese aqui apresentada baseia-se na recente revisão realizada por Marques (2008), como parte integrante de sua tese de doutorado que abordou temas correlatos aos da presente pesquisa.

Frente à demanda crescente de bens e serviços com níveis de qualidade e segurança, as descobertas da nanociência vêm contribuindo significativamente para a ampliação das fronteiras de aplicações nos mais diversos setores da economia.

Segundo Crandall (1997), a nanociência permitiu que se trabalhe na dimensão de 10^{-9} m e, nos casos específicos da indústria eletrônica e de informação, que uma mesma área ou um mesmo volume abrigue cada vez mais componentes. A construção de componentes mais confiáveis, ecoeficientes e, principalmente, de maior capacidade de armazenamento de dados, tornou-se uma realidade, como conseqüência direta dos avanços da nanociência (Bohr, 2002; Rossi, 2004; Appenzeler, 2004).

Na perspectiva de ampliação das fronteiras de aplicações, Bourianoff (2004) destaca que é possível hoje acrescentar um número cada vez maior de transistores em um mesmo processador. Segundo esse autor, o custo por megabyte caiu de U\$6,50, em 1990, para U\$ 0,10, em 2000. Todavia, alerta o autor, quando os transistores atuais atingirem o tamanho de 10 nm^{26} não haverá mais nenhum ganho em capacidade de processamento e em memória, uma vez que o calor dissipado em tais condições irá neutralizar qualquer aumento no número de transistores. Serão necessários novos materiais, processos e estruturas nesse caso, mais que estruturas menores.

Com relação aos nanomateriais, as aplicações mais promissoras, apontadas por Bourianoff (2004), referem-se aos nanotubos de carbono, que podem ter uma resistência de 10 a 100 vezes maior que a do aço e operarem sob temperaturas três vezes mais elevadas. Compostos a base de carbono têm

baixa densidade o que levará a criação de novos materiais altamente resistentes e leves, particularmente demandados pelas indústrias aeroespacial e automobilística (Crandall, 1997; Meridian Institute, 2005). A título de ilustração, é crescente a demanda do setor aeronáutico por novos materiais em nanoescala que permitam conceber aeronaves de maior relação entre peso transportado e distância percorrida.

No setor de energia, há uma grande expectativa em relação ao aperfeiçoamento de dispositivos de energias alternativas, mediante a utilização de materiais nanoestruturados, visando o desenvolvimento de métodos ecoeficientes de geração de energia, ambientalmente corretos (Crandall, 1997; Tour et al., 2002). Dentre as futuras aplicações da nanotecnologia no setor de energia, destaca-se a célula de hidrogênio, tecnologia limpa que poderá diminuir a atual participação dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial (Crandall, 1997).

Apresentaram-se nesta seção inúmeros benefícios das futuras aplicações da nanotecnologia e das comercializadas hoje em dia, com especial ênfase em nanomateriais. A Unesco (2006) alerta, entretanto, que se a inserção de processos e materiais com base em nanotecnologia alcançar rapidamente uma fase de maturidade comercial, como previsto, isso fará com que novas questões éticas e políticas surjam, reavivando outras mais antigas relacionadas aos riscos potenciais associados ao tema.

Complementa-se as visões de Bowman e Hodge (2006) e Illia (2009) em relação ao desenvolvimento da nanotecnologia e suas inúmeras aplicações (representadas graficamente nas Figuras 2.4 e 2.6) com uma síntese dos campos de aplicação da nanotecnologia derivados das diversas áreas do conhecimento, assim como as origens das aplicações tecnológicas em termos dimensionais até se atingir a escala nanométrica (Figura 2.8).

As empresas mantêm uma grande preocupação em relação à aceitação pela sociedade de seus novos produtos. Esse fato se acentua ainda mais se os novos produtos forem originados de tecnologias emergentes - como é o caso da nanotecnologia. É notório que ainda prevalece no meio empresarial a ênfase na rentabilidade econômica de suas atividades fabris e comerciais e, portanto, esse interesse em saber se seu produto será bem aceito ou não está diretamente relacionado às receitas e às margens de lucro decorrentes da comercialização. Entretanto, existe uma preocupação legítima por parte das empresas com relação à deficiência do arcabouço regulatório que envolve a nanotecnologia,

pelas experiências anteriores com a biotecnologia, por exemplo, não terem sido tão rapidamente prósperas como se esperava.

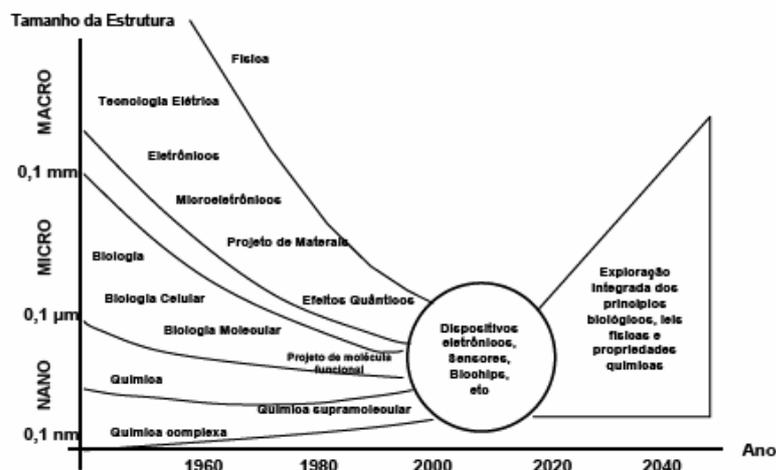


Figura 2.8 – Campos de aplicação da nanotecnologia, na perspectiva da convergência tecnológica em nanoescala

Fonte: Salerno et al. (2008).

2.4. Riscos potenciais da nanotecnologia

A grande questão levantada com a manipulação em escala nanométrica é justamente a característica de manipulação fácil das nanopartículas, bem como a alteração substancial das suas características e propriedades físico-químicas. Um dos principais motivos, pelo qual os nanomateriais podem se comportar de maneira diferente, é que eles possuem uma alta relação superfície/volume, logo uma grande proporção de seus átomos encontra-se na superfície, permitindo que eles reajam mais facilmente com átomos adjacentes (Jefferson 2000; Powell 2008).

Invernizzi e Foladori (2005; 2006) apontam que as nanopartículas podem impactar negativamente a saúde e o meio ambiente e que tais impactos podem atingir diretamente os consumidores dos nanoproductos, bem como os trabalhadores das chamadas nanoindústrias. Em casos de contaminação ambiental, tais partículas tornam-se perigosas para quaisquer indivíduos.

Esses autores destacam ainda que as primeiras investigações sobre os efeitos das nanopartículas em organismos de seres vivos levantaram questões que mereceram maior atenção por parte dos diversos setores da sociedade e investigações acadêmicas.

Como comprovam estudos em ratos que foram expostos a nanotubos de carbono, as nanopartículas podem apresentar um potencial tóxico que afetaria a

saúde humana (Krug, 2005). Como destaca Krug, o contato dos seres humanos com nanopartículas pode acontecer por inalação, ingestão ou absorção pela pele, sendo que cada uma dessas modalidades pode resultar em graus diferenciados de dano à saúde humana.

Apresentando certo grau de imprevisibilidade, a miniaturização dos materiais em nanoescala pode modificar o comportamento das pequenas partículas e nanocomponentes, como também sua mobilidade. Diferentemente das micropartículas, as nanopartículas têm acesso irrestrito ao corpo humano. Ainda há dúvidas sobre a absorção de nanopartículas via cutânea, porém a entrada na circulação sanguínea por inalação e o acesso pelo trato digestivo são praticamente certos (Elsi, 2005).

Segundo Galembeck (2003), há muito tempo nanopartículas são expelidas por motores à explosão de combustíveis fósseis. Quando se respira próximo a descargas de gases por transportes coletivos ou automotivos, cada inalada de ar pode conter em torno de 25 milhões de nanopartículas, em altas concentrações. Esse material rico em nanopartículas pode ser bastante tóxico e agravar ou provocar doenças cardíacas e respiratórias.

Conforme opinião de diversos autores, há duas variáveis que determinam o grau de toxicidade das nanopartículas, independentemente do tipo de partícula: seu tamanho e os efeitos de composição e formato (ETC Group, 2003; Shatkin, 2006). Em 2003, um estudo do ETC Group comprovou que é mais uniforme e mais tóxica a deposição de nanopartículas nas vias respiratórias superiores do que por micropartículas, quando testado o mesmo material.

O grau de toxicidade do material pode ser também influenciado pelo formato e composição da superfície da partícula. Segundo Marques (2008), estudos de contaminação pulmonar em ratos constataram que nanopartículas apresentaram maior toxicidade devido a estruturas específicas de superfície.

Ainda segundo Marques (2008), “para as aplicações de transporte de drogas farmacêuticas, o formato da superfície da nanocápsula requer apurado estudo em função de que o próprio contato com a superfície do tecido humano pode causar reações adversas ou mesmo tóxicas”.

Por apresentarem as mesmas etapas do ciclo de vida e uso que os produtos tradicionais, os resíduos dos produtos baseados em nanotecnologia devem ser removidos para estocagem na natureza ou reciclados em processos específicos. Tratamentos e descarte de resíduos de nanoprodutos realizados por procedimentos não adequados poderão contaminar o meio ambiente de forma irreversível.

As nanopartículas ocorrem naturalmente, mas sua quantidade vem aumentando em função da manufatura industrial e de aplicações médicas. Estudos mostram que a quantidade de nanopartículas aumentará exponencialmente à medida que os produtos incorporarem cada vez mais aplicações nanotecnológicas, ocasionando excessiva ocorrência de nanopartículas no meio ambiente, com possíveis contaminações no ar na água e no solo (ETC Group, 2003).

Assim, as nanopartículas, livres na natureza, podem entrar na cadeia de alimentos de determinadas espécies, desde as plantas aos animais predadores, podendo atingir até os seres humanos (Nanoforum, 2004). A alta reatividade das nanopartículas também preocupa os especialistas e ambientalistas, pois combinadas a outras substâncias ou mesmo isoladas, as nanopartículas podem perdurar no meio ambiente por longos períodos de tempo, que resulta em um efeito cumulativo, afetando as diversas cadeias da vida.

Os riscos potenciais das nanotecnologias atingirem o homem e a natureza de forma irreversível contrapõem os benefícios de um amplo espectro de nanoaplicações (atuais e futuras), como apresentado na Seção 2.3. Nesta seção, discutiram-se os principais riscos das nanotecnologias, na visão de diversos autores e organizações renomadas nessa área, buscando-se evidenciar a importância e a necessidade de fortalecimento das funções de metrologia, normalização e regulação como suporte ao desenvolvimento responsável e próspero dessas tecnologias emergentes.

2.5. Emergência do paradigma tecno-científico da nanotecnologia

A Figura 2.9 representa a evolução de um conhecimento emergente, desde o ponto em que os resultados da pesquisa científica revelam-se promissores para futuros desenvolvimentos tecnológicos, seguindo-se até a comercialização das aplicações competitivas em mercados pioneiros (Day et al, 2003).

Particularmente, a zona do gráfico entre as interseções intituladas “modalidades competitivas” e “aplicações competitivas” apresenta os maiores desafios de gestão da inovação. No contexto da presente dissertação, traduz-se em um amplo espaço de avanços nos campos da metrologia, normalização e regulação de nanotecnologias, como funções de suporte a aplicações competitivas disponibilizadas pelos agentes econômicos.

Antes de se iniciar a apresentação propriamente dita dos sinais que indicam a emergência do paradigma tecno-científico da nanotecnologia,

introduzem-se os conceitos de paradigma científico e tecnológico, segundo Kuhn (1962) e Dosi (1982), respectivamente.

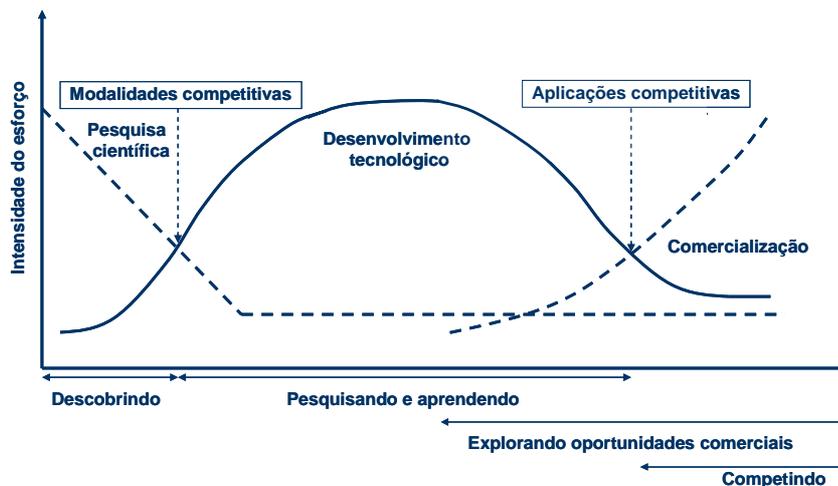


Figura 2.9 – Evolução do conhecimento emergente até a comercialização de aplicações competitivas

Fonte: Day et al, 2003.

Na definição consagrada de Kuhn (1962), paradigma científico é uma "constelação de realizações", incorporando conceitos, valores e técnicas, que são partilhados por uma determinada comunidade científica e utilizados para definir problemas e soluções. O conceito de paradigma científico associa-se ao surgimento de "modalidades competitivas", que pressupõem a descontinuidade tecnológica e a convergência de fluxos independentes de *konw-how*, conforme representado na Figura 2.9.

Já o paradigma tecnológico congrega o conjunto de tecnologias com grande potencial de transformação econômica, mediante padrões e trajetórias definidas pelo contexto dos atores em ação (Dosi, 1982). No gráfico da Figura 2.9, associa-se diretamente aos conceitos de "desenvolvimento tecnológico" e "aplicações competitivas".

Apresentam-se nesta seção os sinais do novo paradigma tecno-científico baseado no desenvolvimento da nanotecnologia, contemplando: (i) produção científica; (ii) propriedade intelectual; (iii) investimentos e (iv) pesquisa em metrologia, normalização e regulação de nanotecnologias.

2.5.1. Produção científica

A produção científica em nanotecnologia pode ser demonstrada mediante as Figuras 2.10 a 2.12, geradas a partir de levantamento realizado pela

pesquisadora diretamente na base de dados Scopus. O número de artigos científicos no período de 1989 a 2009 alcançou um total de 399.132 trabalhos publicados e indexados naquela base de dados (Scopus, 2010).

A Figura 2.10 mostra uma curva ascendente da produção científica em nanotecnologia, destacando-se os dez últimos anos da série, período no qual o número de publicações científicas sobre o tema, indexadas na base de dados consultada, atingiu a média anual de 30.206 publicações.

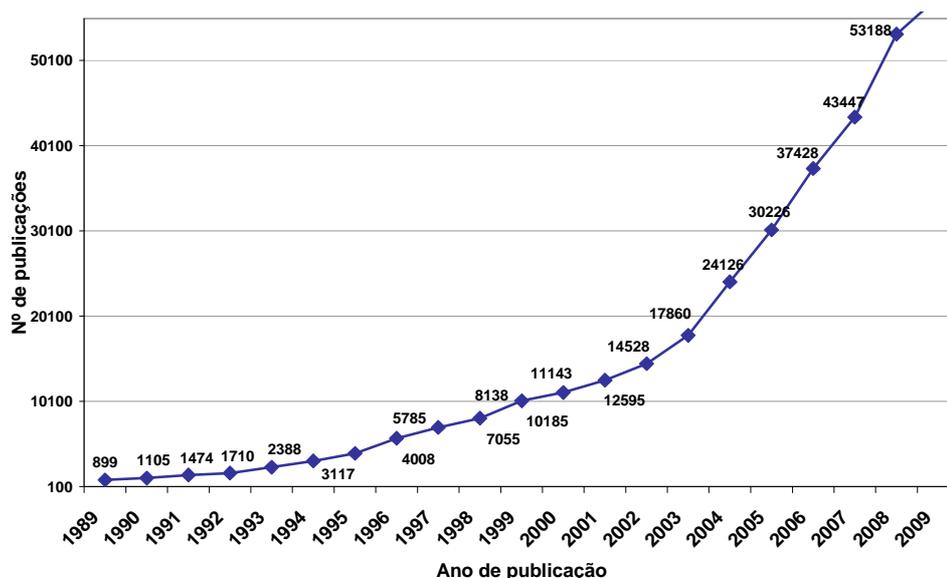


Figura 2.10– Evolução do nº de publicações científicas em nanotecnologia: 1989-2009
Fonte: Busca direta da base de dados Scopus. Acesso em: jul 2010.

Constata-se que a curva tem um crescimento exponencial após 1982, propiciado pela maior utilização de técnicas avançadas de metrologia nanodimensional, como a microscopia de varredura por tunelamento (STM), que permitiram estudos específicos de materiais e partículas em nanoescala. Destaca-se o marco histórico da construção do microscópio eletrônico de varredura por tunelamento em 1981 (Figura 2.7).

A Figura 2.11 apresenta os resultados da análise das 399.132 publicações científicas, classificadas pelos temas mais importantes.

Observa-se que os temas objeto da presente dissertação se encontram entre os mais importantes no *ranking* da produção científica, a saber: materiais nanoestruturados (84.303 artigos); nanopartículas (70.618); nanoestruturas (24.574); nanotubos de carbono (23.802) e nanocompósitos (16.184). Cabe destacar também a presença de três técnicas metrológicas abordadas nos capítulos 4 e 6: microscopia eletrônica de transmissão; microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X.

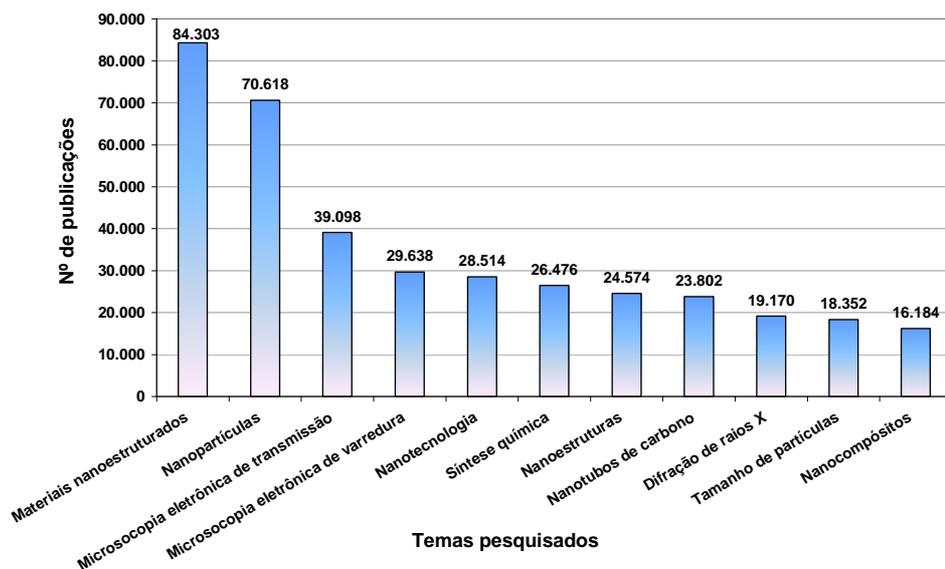


Figura 2.11 – Nº de publicações científicas em nanotecnologia, classificadas por tema pesquisado: 1989-2009

Fonte: Busca direta da base de dados Scopus. Acesso em: jul 2010.

Na seqüência, a Figura 2.12 apresenta o conjunto das 399.132 publicações científicas, classificadas por área de especialização, conforme sistema de indexação da referida base.

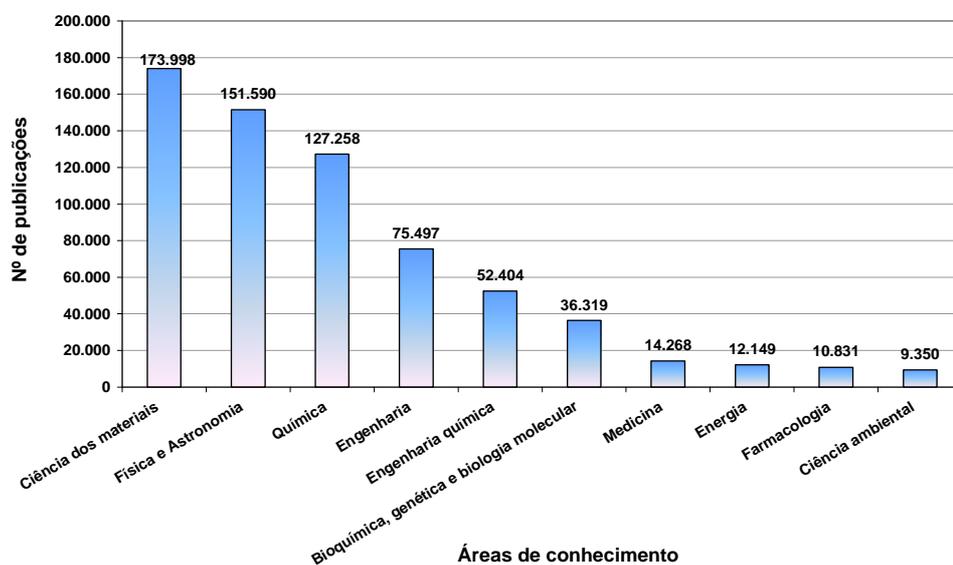


Figura 2.12 – Nº de publicações científicas em nanotecnologia, classificadas por área de conhecimento: 1989-2009

Fonte: Busca direta da base de dados Scopus. Acesso em: jul 2010.

Observa-se que uma grande concentração de publicações em três áreas, sendo Ciência dos Materiais a área com maior número de publicações (173.998), seguida da Física e Astronomia (151.590) e da Química, com 127.258

publicações científicas. Ressalta-se, porém, que uma determinada publicação pode ser classificada em mais de uma área de conhecimento.

2.5.2. Propriedade intelectual

Na seqüência, apresentam-se os resultados do levantamento de patentes referentes à nanotecnologia no período 1998-2009. Esse levantamento, realizado pela pesquisadora diretamente na base Derwent Innovations Index, abrangeu o mesmo período do levantamento anterior e identificou um total de 91.995 patentes no referido período.

Os resultados do levantamento de patentes permitiram identificar: (i) as principais áreas de especialização associadas ao conjunto de patentes (critério “top 10”), conforme indexação das áreas pela própria base de dados consultada; (ii) o número de depositantes e os destaques, enfatizando-se a presença de empresas (critério “top 25”); e (iii) uma análise por código da International Patent Classification (ICP), que revela as subclasses ICP de maior representatividade para posterior monitoramento da evolução da propriedade intelectual nesse tema nos próximos anos.

A Tabela 2.1 apresenta o conjunto das 91.995 patentes, classificadas por área de especialização.

Tabela 2.1 - Patentes em nanotecnologia, classificadas por área do conhecimento: 1989 - 2009 (critério “top 10”)

Áreas de conhecimento	Nº de patentes	Percentual (%)
Química	76.061	82,68
Engenharia	60.668	65,94
Instrumentação	55.910	60,77
Ciência dos Polímeros	34.412	37,40
Farmacologia	16.946	18,42
Ciência da Imagem e Tecnologia fotográfica	8.937	9,71
Energia e combustíveis	8.722	9,48
Biotecnologia e microbiologia aplicada	8.171	8,88
Engenharia Metalúrgica e Metalurgia	7.088	7,70
Ciência dos Materiais	6.769	7,36
Total: 24 áreas		91.995 patentes

Fonte: Busca direta da base de dados Derwent Innovation Index. Acesso em: jul 2010.

Pelas informações apresentadas na Tabela 2.1, constata-se que a grande maioria das patentes está associada diretamente à área de Química (82,68%).

Em um segundo patamar, situam-se as áreas de Engenharia e Instrumentação (65,94 e 60,77%, respectivamente). A pesquisa indicou um total de 24 áreas de conhecimento.

Neste *ranking* (“*top 10*”), as demais áreas possuem indicadores inferiores, na faixa de 37,40 a 7,36 % de patentes classificadas segundo o sistema da base Derwent Innovations Índex nas respectivas áreas. Cabe ressaltar, porém, que uma determinada patente pode ser classificada em mais de uma área de conhecimento.

Na seqüência, a Tabela 2.2 mostra os resultados da análise das 91.995 patentes, apresentados segundo as subclasses e respectivos códigos da International Patent Classification (ICP). As subclasses ICP de maior representatividade são: B82B – “Nano-estruturas; fabricação ou seu tratamento”; H01L – “Dispositivos semicondutores; dispositivos elétricos de estado sólido, não incluídos em outro local”; e C01B – “Elementos não-metálicos; seus compostos”.

Tabela 2.2 - Patentes em nanotecnologia, por classe da International Patent Classification: 1989 - 2009 (critério “*top 10*”)

Classe ICP	Nº de patentes	Percentual (%)
B82B-003/00	6.293	6,84
H01L-021/02	4.644	5,05
C01B-031/02	4.030	4,38
B82B-001/00	3.893	4,23
C01B-031/00	3.664	3,98
C08K-003/00	3.557	3,86
A61K-009/14	2.730	2,96
C12Q-001/68	1.811	1,96
H01L-029/66	1.781	1,93
A61P-035/00	1.419	1,54
Total: 27.193 classes ICP		91.995 patentes

Fonte: Busca direta da base de dados Derwent Innovation Index. Acesso em: jul 2010.

O mesmo conjunto de patentes foi analisado em relação a seus depositantes, conforme apresentado na Tabela 2.3.

A empresa que se encontra em segundo lugar no *ranking* dos depositantes das patentes em nanotecnologia no período 1989-2009 é a Samsung Electronics Co Ltd com 930 patentes, seguida Hon Hai Precision Ind. Co. Ltd. com 825 patentes. Os demais depositantes que se destacam no *ranking* são três universidades: a University of Qinghua, da China, com 717 patentes; a University of California, dos EUA, com 651 patentes e a University of Zhejiang, também da China, com 585 patentes.

Tabela 2.3 - Patentes em nanotecnologia, classificadas por depositante: 1989 - 2009 (critério "top 10")

Depositante	Nº de patentes	Percentual (%)
Yang, M.	947	1,03
Samsung Electronics Co Ltd	930	1,01
Hon Hai Precision Ind Co Ltd	825	0,89
University of Qinghua	717	0,78
University of California	651	0,71
Samsung Sdi Co Ltd	619	0,67
University of Zhejiang	585	0,64
Dokuritsu Gyosei Hojin Sangyo Gijutsu So	547	0,60
International Business Machines Corp	522	0,57
Industrial Technology Research Institute	515	0,56
Total: 55.198 depositantes		91.995 patentes

Fonte: Busca direta da base de dados Derwent Innovation Index. Acesso em: jul 2010.

Vale destacar que, no total, a busca identificou 55.198 depositantes, o que demonstra a emergência do paradigma tecno-científico da nanotecnologia, juntamente com os indicadores da produção científica. Outro aspecto de destaque é, que já se esperava, a diferença entre os dois tipos de indicadores: enquanto a produção científica atingiu 399.132 publicações no período 1989 – 2009, o indicador de propriedade intelectual alcançou um total de 91.995 patentes no mesmo período.

2.5.3. Investimentos

Nos últimos anos, as empresas têm investido anualmente mais de US\$ 3,8 bilhões em P&D em nanotecnologia e muitas já estão com seus novos produtos no mercado. Espera-se que a difusão de novos produtos baseados em nanotecnologia influencie significativamente a produção de bens manufaturados nos próximos seis anos.

Conforme estudo da Lux Research Inc. (2004), os produtos que incorporaram novas nanotecnologias totalizaram um mercado de US\$13 bilhões em 2004, menos que 0,1% da produção global de bens manufaturados naquele mesmo ano. A projeção para 2014, como apresentado na Figura 2.13, é que esse mercado atinja cifras de US\$2,6 trilhões, representando 15% da produção global de bens manufaturados neste horizonte (2014).

Os investimentos anuais em nanotecnologia estão no patamar de um bilhão de dólares em nível mundial e o número de novos entrantes cresceu de 100, em 1999, para mais de 1000 em três anos. Segundo esse autor, a iniciativa privada – integrada por empresas de setores relacionados ao uso intensivo de

nanotecnologias e por investidores profissionais que aportam capital em pequenos empreendimentos de base tecnológica, já havia investido mais de 500 milhões de dólares em pesquisa e desenvolvimento em nanotecnologia até o ano de 2001.

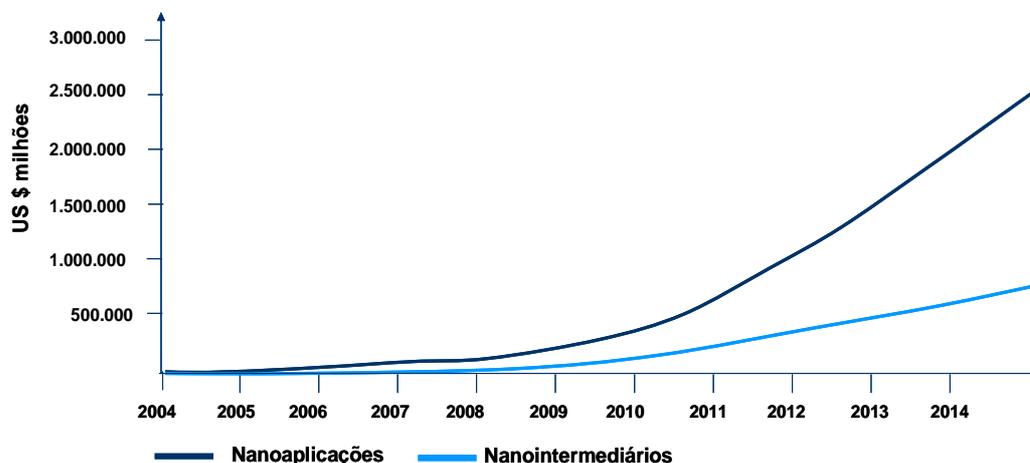


Figura 2.13 - Mercado global de nanotecnologia por estágio da cadeia de valor: 2004 – 2014

Fonte: Lux Research Inc.(2004).

De acordo com Rocco (2003), os investimentos de órgãos governamentais em pesquisa e desenvolvimento ultrapassaram o patamar dos 3 bilhões de dólares no setor de nanotecnologia em 2003, sendo que pelo menos 40 países já iniciaram pesquisas neste campo.

Como reportado por Galembeck e Rippel (2004), diversos países, como os Estados Unidos, por exemplo, já definiram estratégias multidisciplinares para o desenvolvimento de nanotecnologia. Os países da Comunidade Européia e o Japão lançaram programas de desenvolvimento neste campo, e seus planos visam objetivos para o final da primeira década do milênio.

2.5.4. Metrologia, normalização e regulação

Desde a publicação do estudo “*Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*” pela The Royal Society and the Royal Academy of Engineering, em 2004, até a atualidade, constata-se que o número de estudos, pesquisas científicas e iniciativas associadas à metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia tem evoluído de forma significativa em nível mundial (The Royal Society/ The Royal Academy of Engineering, 2004).

Parte-se do pressuposto que inúmeras pesquisas surgiram nos diversos núcleos acadêmicos ao redor do mundo, incentivadas em grande parte pelos desafios e alertas enunciados naquele estudo pioneiro e abrangente.

Busca-se nesta seção mostrar evidências da evolução da produção científica e iniciativas em nível mundial no que tange a essas três funções: metrologia em nanoescala, normalização e regulação de nanotecnologia.

Apresentam-se os indicadores da produção científica sobre essas funções nas Figuras 2.14 a 2.16, geradas a partir de levantamento realizado pela pesquisadora diretamente na base de dados Scopus. O número de artigos científicos no período de 1989 a 2009 alcançou um total de 17.710 trabalhos publicados e indexados naquela base de dados (Scopus, 2010), o que mostra a importância dessas funções para o desenvolvimento responsável da nanotecnologia.

Os dados da Figura 2.14 mostram que o estudo “*Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*” deve ter impactado de maneira muito positiva o desenvolvimento de publicações científicas em torno da temática metrologia, regulação e normalização em nanotecnologia. De fato, a partir de 2004, a curva começa a crescer exponencialmente e o número de publicações mais que triplica no período 2004 -2009.

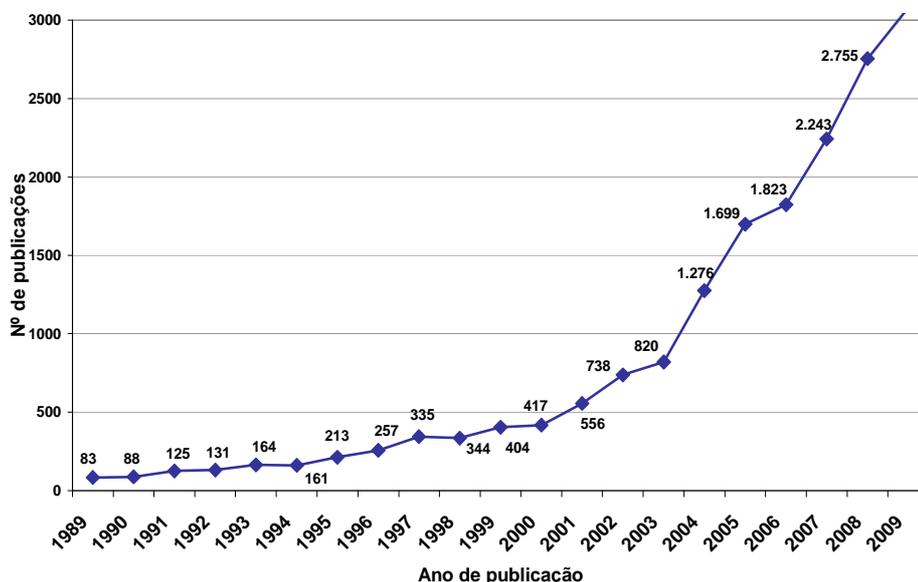


Figura 2.14 – Nº de publicações científicas em metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia: 1989-2009

Fonte: Busca direta da base de dados Scopus. Acesso em: jul 2010.

A Figura 2.15 apresenta os resultados da análise das 17.710 publicações científicas classificadas pelos temas mais importantes.

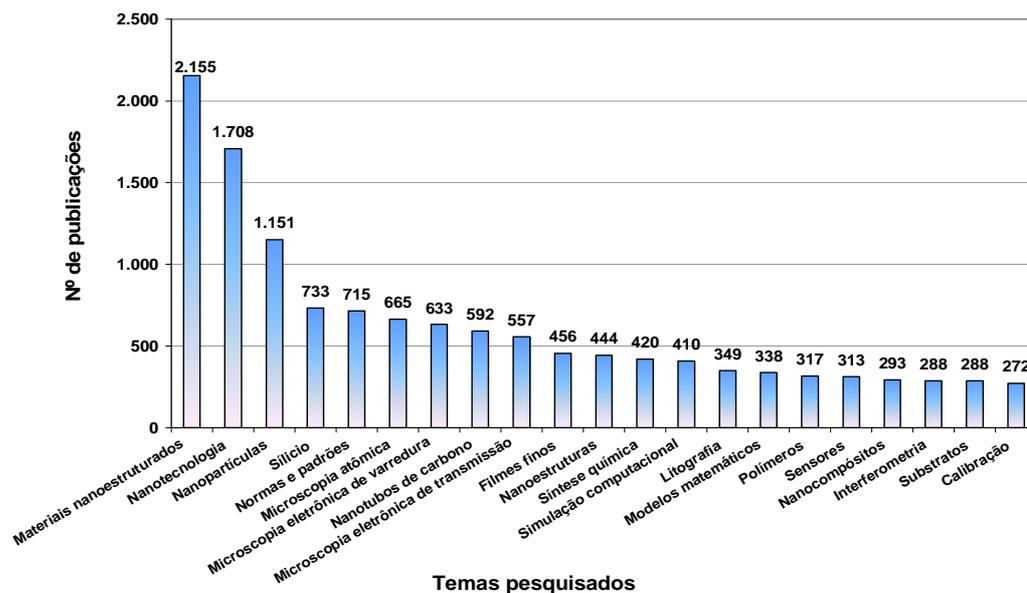


Figura 2.15 – Nº de publicações científicas em metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia, classificadas por tema pesquisado: 1989-2009

Fonte: Busca direta da base de dados Scopus. Acesso em: jul 2010.

Observa-se que aspectos metrológicos, normativos e regulatórios relacionados aos temas da presente dissertação se encontram entre os mais estudados e publicados no *ranking* da produção científica, a saber: materiais nanoestruturados (2.155 artigos) e nanopartículas (1.151 artigos).

Na seqüência, a Figura 2.16 apresenta o conjunto das 17.710 publicações científicas, classificadas por área de conhecimento.

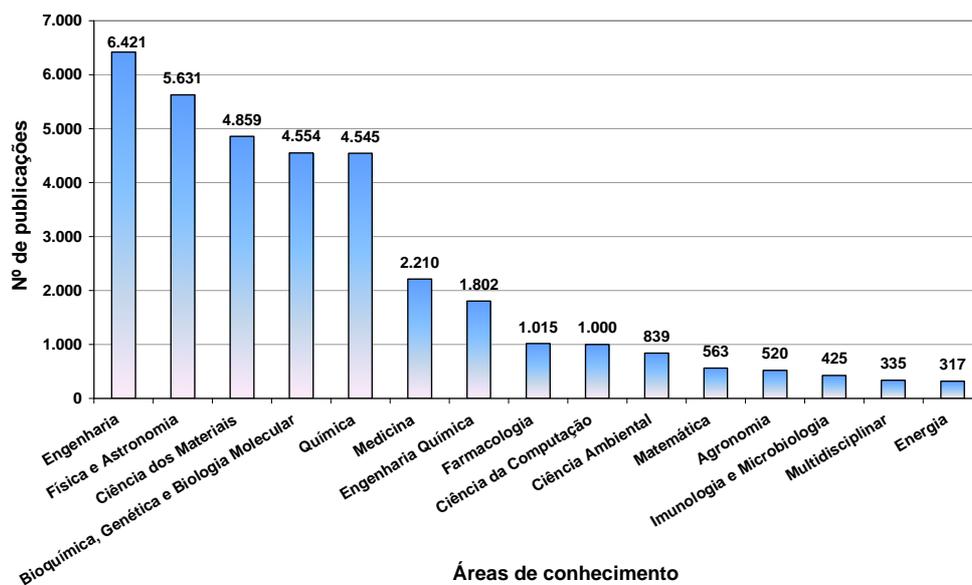


Figura 2.16 – Nº de publicações científicas em metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia, classificadas por área de conhecimento: 1989-2009

Fonte: Busca direta da base de dados Scopus. Acesso em: jul 2010.

Observa-se que uma grande concentração de publicações em duas áreas, sendo a Engenharia a área com maior número de publicações (6.421), seguida da Física e Astronomia com 5.631 publicações científicas. Em um segundo patamar, situam-se as áreas de Ciências dos Materiais, Bioquímica, Genética e Biologia Molecular e Química com o número de publicações na faixa de 4.860 a 4.545 trabalhos. Ressalta-se, porém, que uma determinada publicação pode ser classificada em mais de uma área de conhecimento.

Com relação aos estudos e iniciativas que estão sendo desenvolvidas em nível mundial, o capítulo 4 apresentará um panorama atualizado da metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia em geral e, em particular de nanomateriais e nanopartículas.

Dentre os estudos e referenciais externos identificados na fase da revisão bibliográfica e pesquisa documental e que serviram de base para a elaboração dos capítulos 4 e 6, destacam-se: (i) o relatório final do projeto Emergnano, sob o título “*Emergnano: a review of completed and near completed environment, health and safety research on nanomaterials and nanotechnology*” (Emergnano, 2009); (ii) os relatórios do projeto Nano-Strand, desenvolvido na Comunidade Européia (Nano-Strand, 2006; 2007); (iii) o estudo intitulado “*An overview of the framework of current regulation affecting the development and marketing of nanomaterials*”, de autoria de Frater et al (2006); e (iv) o estudo “*Developments in nanotechnologies regulation and standards*”, publicado pelo ObservatoryNano em 2010, que aborda iniciativas relevantes de regulação, auto-regulação e normalização, conduzidas em países europeus, nos EUA, no Canadá, no Japão, na China, na Índia, na Austrália e em Taiwan (ObservatoryNano, 2010).

2.6. Considerações finais sobre o capítulo

Este capítulo reveste-se de fundamental importância para o entendimento e discussão das questões centrais da presente dissertação.

Apresentou os conceitos e definições básicas de nanotecnologia e dos principais componentes de sua cadeia de valor e buscou destacar os benefícios e riscos potenciais do desenvolvimento das aplicações competitivas de nanotecnologia. Baseou-se primordialmente no estudo publicado pela The Royal Society e The Royal Academy of Engineering em 2004.

Por meio de gráficos gerados a partir de levantamento realizado diretamente em bases de dados internacionais, como a Scopus e a Derwent

Innovation Index, evidenciou-se o expressivo aumento da produção científica e da propriedade intelectual em nanotecnologia nos últimos anos.

A fase da revisão bibliográfica e pesquisa documental permitiu que se identificassem importantes referenciais externos sobre metrologia, normalização e regulação como funções de suporte ao desenvolvimento e consolidação de sistemas nacionais de inovação em nanotecnologia, em nível mundial.

Não obstante a qualidade das informações sobre os temas centrais da dissertação apresentadas neste capítulo, ressalta-se a necessidade de mais pesquisas e investigação nas áreas da nanometrologia, normalização e regulação para que se efetive a difusão das inovações de base nanotecnológica de forma integrada, responsável e segura.