



Ana Rusmerg Giménez Ledesma

**Metrologia, normalização e regulação de nanomateriais no
Brasil: proposição de um modelo analítico-prospectivo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação).

Orientador: Prof^a Maria Fatima Ludovico de Almeida
Co-orientador: Prof. Fernando Lázaro Freire Jr.

Rio de Janeiro
Novembro de 2010



Ana Rusmerg Giménez Ledesma

Metrologia, normalização e regulação de nanomateriais no Brasil: proposição de um modelo analítico-prospectivo

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada:

Prof^a Maria Fatima Ludovico de Almeida

Orientadora

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Fernando Lázaro Freire Jr.

Co-orientador

Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. Carlos Augusto Caldas de Moraes

Programa de Mestrado em Economia Empresarial - UCAM

Prof. Mauricio Nogueira Frola

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 08 de novembro de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e dos orientadores.

Ana Rusmerg Giménez Ledesma

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense em 2007. Tem experiência em sistemas de gestão e atua como consultora técnica gerencial.

Ficha Catalográfica

Giménez Ledesma, Ana Rusmerg

Metrologia, normalização e regulação de nanomateriais no Brasil: proposição de um modelo analítico-prospectivo / Ana Rusmerg Giménez Ledesma; orientador: Maria Fatima Ludovico de Almeida; co-orientador: Fernando Lázaro Freire Jr. – 2010.
186 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, 2010.
Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Normalização. 3. Regulação. 4. Nanotecnologia. 5. Nanomateriais. 6. Nanopartículas. 7. Prospecção. 8. Brasil. I. Almeida, Maria Fatima Ludovico de. II. Freire Jr., Fernando Lázaro. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

Agradecimentos

*Se não podes entender, crê para que entendas. A fé precede, o intelecto segue
(Santo Agostinho).*

Devo agradecer imensamente Àquele que é meu mentor maior em todos os percursos da minha vida, que me dá perseverança, saúde e companhia nas horas que devo compreender meu trajeto, Deus.

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para meu desenvolvimento ao longo da minha jornada acadêmica. Dentre tantos em especial:

À Professora e Orientadora Maria Fatima Ludovico de Almeida, que me proporcionou não somente lições acadêmicas, mas de vida, de maneira indescritível e imensurável, com muito carinho e paciência.

Ao Professor e Co-orientador Fernando Lázaro Freire Jr., pelas orientações, revisões e correções.

Ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (PósMQI), Professor Mauricio Nogueira Frota por toda a confiança depositada, atenção e incentivo para a realização do curso de mestrado MQI.

Ao meu cúmplice eterno, amigo incondicional e leal, meu querido marido Felipe, pelos inúmeros momentos de apoio, carinho e dedicação.

Aos meus adorados pais Pedro e Nêca e amados irmãos Laura e Jorge, por estarem sempre ao meu lado, com seu carinho e solidariedade.

À Dra. Cynthia pelo amor maternal e incondicional, ao Eduardo pelo carinho de sempre, a ambos pela paciência fraternal.

À PUC-Rio pela bolsa de isenção proporcionada ao longo do curso.

Ao professor Heitor Luiz Murat de Meirelles Quintella, pela confiança depositada e apoio para a realização desta meta.

Ao professor Marco Aurélio Cabral Pinto pelos seus ensinamentos e incentivo para a concretização desta empreitada.

Aos Coordenadores do Projeto Nanostrand, da Comunidade Européia, especialmente ao Dr. Jean Marc Aublant, do Laboratoire National de Métrologie

et d'Essais (LNE) da França; ao Dr. Michael Solar do Institute of Experimental and Applied Physics, da Czech Technical University in Prague, da Tchecoslováquia, e ao Dr. Norbert Siegel, da DIN, na Alemanha, que gentilmente me enviaram novos conteúdos e documentos internos do Projeto. Esse rico material me permitiu compreender melhor as questões de metrologia e normalização em nanotecnologia na prática e muito me inspirou na fase de construção do modelo analítico-prospectivo.

E, finalmente, a cada um dos meus colegas de curso, pelos momentos de convívio tão válidos para minha vida.

*Dedico este trabalho à minha querida avó Antônia e ao meu tio Isa,
pessoas exemplares de caráter e de valores familiares, dignos de orgulho de
toda a minha família.*

Eternamente grata, por tanto amor, carinho e zelo.

Muitas saudades.

Resumo

Ledesma, Ana Rusmerg Gimenez; Almeida, Maria Fatima Ludovico de; Freire Jr., Fernando Lázaro. **Metrologia, normalização e regulamentação de nanomateriais no Brasil: proposição de um modelo analítico-prospectivo**. Rio de Janeiro, 2010. 186 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo da dissertação é propor um modelo analítico-prospectivo como ferramenta de apoio a processos decisórios em questões referentes à metrologia, normalização e regulação de nanomateriais no Brasil, baseando-se em referenciais internacionais e iniciativas em curso no mundo. No contexto do desenvolvimento da nanotecnologia no Brasil, a motivação da pesquisa é destacar a importância e os benefícios para o país da metrologia, normalização e regulação de nanomateriais, na perspectiva de aplicação do modelo pelos principais grupos de interesse comprometidos com o desenvolvimento responsável desses novos materiais. A metodologia compreende: (i) pesquisa bibliográfica e documental; (ii) levantamento de iniciativas referentes à metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia em nível internacional; (iii) desenvolvimento de um modelo conceitual que integre as três funções – metrologia, normalização e regulação de nanomateriais; e (iv) elaboração do instrumento de pesquisa *survey* e da ferramenta para a construção de *roadmaps* estratégicos. Destacam-se como resultados: (i) visão global dos referenciais externos sobre metrologia, normalização e regulação de nanomateriais, em geral, e de nanopartículas, em particular; (ii) o modelo analítico-prospectivo; e (iii) o instrumento de pesquisa *survey* para a construção de indicadores nacionais e a ferramenta de construção de *roadmaps* estratégicos das atividades de metrologia, normalização e regulação de nanomateriais no Brasil.

Palavras-chave

Metrologia; normalização; regulação; nanotecnologia; nanomateriais; nanopartículas; prospecção; Brasil.

Abstract

Ledesma, Ana Rusmerg Gimenez; Almeida, Maria Fatima Ludovico de; Freire Jr., Fernando Lázaro (Advisors). **Metrology, standardization and regulation of nanomaterials in Brazil: a proposal for an analytical-prospective model**. Rio de Janeiro, 2010. 186 p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-graduação em Metrologia. Concentration Area: Metrology for Quality and Innovation, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main objective of this dissertation is to propose an analytical-prospective model as a tool to support decision-making processes concerning metrology, standardization and regulation of nanomaterials in Brazil, based on international references and ongoing initiatives in the world. In the context of nanotechnology development in Brazil, the motivation for carrying out this research is to identify potential benefits of metrology, standardization and regulation of nanomaterials production, within the perspective of applying the model in the country, by the main stakeholders in these areas. The methodology encompasses: (i) bibliographical and documental review on metrology, standardization and regulation of nanomaterials, in general, and nanoparticles, in special; (ii) review of international studies concerning dissertation's central themes; (iii) development of a conceptual model that integrates the three functions - metrology, standardization and regulation of nanomaterials; (iv) development of a *survey* questionnaire and a strategic roadmapping tool. The main results can be summarized as follows: (i) an overview of international studies on metrology, standardization and regulation of nanomaterials, and nanoparticles, in special; (ii) the analytical-prospective model; and (iii) the survey questionnaire and the roadmapping tool for metrology, standardization and regulation of nanomaterials in Brazil, based on international references and ongoing initiatives in the world.

Keywords

Metrology; standardization; regulation; nanotechnology; nanomaterials; nanoparticles; roadmapping; Brazil.

Sumário

1. Introdução.....	16
1.1 Definição do problema de pesquisa.....	18
1.2 Objetivos: geral e específicos.....	19
1.3 Motivação.....	21
1.4 Metodologia.....	22
1.5 Estrutura da dissertação.....	25
2. Nanotecnologia: conceituação e emergência do paradigma tecno-científico.....	27
2.1 Conceituação.....	27
2.1.1 Conceitos básicos.....	27
2.1.2 Manufatura em nanoescala.....	29
2.1.3 Convergência futura das abordagens <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i>	32
2.1.4 Cadeia de valor da nanotecnologia.....	34
2.2 Breve histórico do desenvolvimento da nanotecnologia.....	37
2.3 Benefícios da nanotecnologia.....	39
2.4 Riscos potenciais da nanotecnologia.....	41
2.5 Emergência do paradigma tecno-científico da nanotecnologia.....	43
2.5.1 Produção científica.....	45
2.5.2 Propriedade intelectual.....	47
2.5.3 Investimentos.....	49
2.5.4 Metrologia, normalização e regulação.....	50
2.6 Considerações finais sobre o capítulo.....	53
3. Aspectos regulatórios de tecnologias emergentes: riscos e desafios associados à nanotecnologia.....	55
3.1 Regulação: conceitos.....	55
3.2 Regulação de tecnologias emergentes que precederam a nanotecnologia.....	56
3.3 Regulação na esfera nanométrica.....	58
3.3.1 Aspectos técnicos da regulação de nanotecnologia.....	59
3.3.2 Aspectos holísticos da regulação de nanotecnologia.....	62
3.4 Considerações finais sobre o capítulo.....	67

4. Panorama mundial da metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia.....	71
4.1 Metrologia.....	72
4.1.1 Metrologia nanodimensional.....	75
4.1.2 Metrologia nanoquímica.....	76
4.1.3 Metrologia nanomecânica.....	77
4.1.4 Metrologia aplicada a nanomateriais estruturados.....	78
4.2 Normalização.....	80
4.2.1 Iniciativas da ISO e da IEC em nanotecnologia.....	81
4.2.2 Iniciativas de outras organizações de normalização.....	85
4.2.3 Iniciativas da União Européia.....	86
4.2.4 Atividades da OCDE.....	89
4.3 Regulação de nanotecnologias.....	90
4.3.1 Iniciativas da União Européia.....	91
4.3.2 Experiências de países europeus selecionados.....	94
4.3.3 A experiência dos Estados Unidos da América.....	100
4.3.4 A experiência do Canadá.....	105
4.3.5 A experiência da China.....	107
4.3.6 A experiência da Índia.....	108
4.3.7 A experiência do Japão.....	110
4.3.8 A experiência de Taiwan.....	111
4.4 Iniciativas de auto-regulação.....	112
4.4.1 Código de Conduta da Comissão Européia.....	113
4.4.2 <i>Voluntary Reporting System</i> (VRS).....	114
4.4.3 <i>Nanoscale Materials Stewardship Program</i> (NMSP).....	115
4.4.4 <i>Basf Code of Conduct Nanotechnology</i>	116
4.4.5 <i>DuPont Nanorisk Framework</i>	117
4.4.6 <i>Responsible Nanocode</i>	118
4.4.7 <i>AssuredNano</i>	119
4.5 Considerações finais sobre o capítulo.....	120
5 Nanociência e nanotecnologia no Brasil.....	122
5.1 Breve histórico.....	123
5.2 Política de Desenvolvimento Produtivo e o Programa Mobilizador de Nanotecnologia.....	125
5.3 Fórum de Competitividade em Nanotecnologia: recomendações dos Grupos de Trabalho.....	129
5.4 Tecnologia Industrial Básica para o desenvolvimento responsável e sustentável da nanotecnologia no Brasil.....	132
5.5 Considerações finais sobre o capítulo.....	135

6 Metrologia, normalização e regulação no Brasil: proposição de um modelo analítico-prospectivo.....	137
6.1 O modelo analítico-prospectivo: visão geral.....	138
6.1.1 Referenciais internacionais adotados.....	138
6.1.2 Características do modelo, dimensões e construtos.....	140
6.1.3 Representação e descrição geral do modelo.....	142
6.2 Revisão do estado-da-arte.....	146
6.2.1 Estado-da-arte da metrologia: foco em nanomateriais.....	146
6.2.2 Estado-da-arte da normalização: foco em nanomateriais.....	148
6.2.3 Estado-da-arte da regulação: foco em nanomateriais.....	149
6.3 Diagnóstico da situação atual e identificação de desafios.....	151
6.3.1 Objetivo da pesquisa <i>survey</i>	151
6.3.2 Desenho do instrumento de pesquisa.....	151
6.3.3 Abrangência da pesquisa.....	153
6.3.4 Periodicidade da pesquisa.....	154
6.3.5 Unidade estatística e de análise.....	154
6.3.6 Classificação das atividades relacionadas à nanotecnologia.....	155
6.3.7 Método de coleta das informações.....	155
6.3.8 Tratamento e análise das informações.....	156
6.3.9 Proposição de indicadores.....	157
6.4 Construção de <i>roadmaps</i> estratégicos.....	158
6.4.1 Objetivo da ferramenta.....	159
6.4.2 Desenho genérico da ferramenta.....	160
6.4.3 Horizontes temporais recomendados.....	162
6.4.4 Dinâmica da construção coletiva dos <i>roadmaps</i> estratégicos.....	162
6.4.5 A título de ilustração: <i>roadmaps</i> estratégicos no âmbito do Projeto NanoStrand.....	163
6.5 Considerações finais sobre o capítulo.....	166
7. Conclusões	168
Referências bibliográficas.....	173
Anexo 1. Proposta de instrumento para a pesquisa <i>survey</i>.....	A-1

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos.....	23
Figura 2.1 - Representação da nanoescala.....	29
Figura 2.2 - Métodos de manufatura em nanoescala: <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i>	30
Figura 2.3 - Processo genérico de produção de nanopartículas.....	31
Figura 2.4 - Convergência das abordagens <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i>	33
Figura 2.5 - Cadeia de valor da nanotecnologia.....	35
Figura 2.6 - Prospecção das aplicações de nanotecnologias: 1ª e 2ª gerações	36
Figura 2.7 - Marcos históricos do desenvolvimento da nanotecnologia.....	38
Figura 2.8 - Campos de aplicação da nanotecnologia, na perspectiva da convergência tecnológica em nanoescala.....	41
Figura 2.9 - Evolução do conhecimento emergente até a comercialização de aplicações competitivas.....	44
Figura 2.10 - Evolução do nº de publicações científicas em nanotecnologia: 1989-2009.....	45
Figura 2.11 - Nº de publicações científicas em nanotecnologia, classificadas por tema pesquisado: 1989-2009.....	46
Figura 2.12 - Nº de publicações científicas em nanotecnologia, classificadas por área de conhecimento: 1989-2009.....	46
Figura 2.13 - Mercado global de nanotecnologia por estágio da cadeia de valor: 2004-2014.....	50
Figura 2.14 - Nº de publicações científicas em metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia: 1989-2009.....	51
Figura 2.15 - Nº de publicações científicas em metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia, classificadas por tema pesquisado: 1989-2009.....	52
Figura 2.16 - Nº de publicações científicas em metrologia, normalização e regulação de nanotecnologia, classificadas por área de conhecimento: 1989-2009.....	52
Figura 3.1 - Mapa do ciclo de vida dos nanomateriais.....	65
Figura 4.1 - Escopo e modelagem das ações do GT1 do Comitê Técnico ISO 229.....	82
Figura 5.1 - Política de Desenvolvimento Produtivo em três níveis.....	127
Figura 5.2 - Tecnologia Industrial Básica (TIB) para o desenvolvimento responsável e sustentável da nanotecnologia no Brasil.....	133

Lista de Figuras (Cont.)

Figura 6.1 -	Modelo para diagnóstico e prospecção da metrologia, normalização e regulação de nanotecnologias no Brasil.....	144
Figura 6.2 -	Proposição de indicadores em pesquisas do tipo <i>survey</i>	158
Figura 6.3 -	Esquema genérico do <i>roadmap</i> estratégico para metrologia, normalização e regulação de nanomateriais no Brasil: primeiro ciclo de construção.....	160
Figura 6.4 -	Esquema genérico do <i>roadmap</i> estratégico para metrologia, normalização e regulação de nanomateriais no Brasil: ciclo de consolidação sistêmica.....	161
Figura 6.5 -	<i>Roadmap</i> estratégico de metrologia nanoquímica: primeiro ciclo de construção.....	164
Figura 6.6 -	<i>Roadmap</i> estratégico de metrologia nanodimensional: primeiro ciclo de construção.....	165
Figura 6.7 -	<i>Roadmap</i> estratégico de metrologia nanodimensional: ciclo de consolidação sistêmica.....	165
Figura 6.8 -	<i>Roadmap</i> estratégico de normalização de nanomateriais: ciclo de consolidação sistêmica.....	166

Lista de Quadros

Quadro 4.1 - Escopo do panorama mundial da nanometrologia: foco em quatro disciplinas.....	74
Quadro 5.1 - Marcos institucionais do desenvolvimento da nanotecnologia no Brasil.....	125
Quadro 5.2 - Ações e medidas do Programa Mobilizador em Nanotecnologia...	128
Quadro 6.1 - Referenciais internacionais adotados	139
Quadro 6.2 - Dimensões e construtos do modelo analítico-prospectivo.....	142
Quadro 6.3 - Técnicas metrológicas para nanomateriais: estado-da-arte mundial.....	146
Quadro 6.4 - Principais temas de normalização para nanomateriais em nível mundial.....	148
Quadro 6.5 - Questões regulatórias referentes a nanomateriais em nível mundial.....	150
Quadro 6.6 - Grade analítica e conteúdos de investigação da pesquisa <i>survey</i>	153

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 -	Patentes em nanotecnologia, classificadas por área do conhecimento: 1989 - 2009 (critério “ <i>top 10</i> ”).....	47
Tabela 2.2 -	Patentes em nanotecnologia, por classe da International Patent Classification: 1989 - 2009 (critério “ <i>top 10</i> ”).....	48
Tabela 2.3 -	Patentes em nanotecnologia, classificadas por depositante: 1989 - 2009 (critério “ <i>top 10</i> ”).....	49