

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS JURÍDICAS E ECONÔMICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA**

**PAULO HENRIQUE ASSIS FEITOSA**

**A TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA RUMO À ECONOMIA DE BAIXO  
CARBONO: O PAPEL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

**VITÓRIA  
2010**

**PAULO HENRIQUE ASSIS FEITOSA**

**A TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA RUMO À ECONOMIA DE BAIXO  
CARBONO: O PAPEL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia do Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Economia.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sonia Maria Dalcomuni.

**VITÓRIA  
2010**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

F311t Feitosa, Paulo Henrique Assis, 1984-  
A transição tecnológica rumo a economia de baixo carbono :  
o papel da energia solar fotovoltaica / Paulo Henrique Assis  
Feitosa. – 2010.  
150 f. : il.

Orientadora: Sonia Maria Dalcomuni.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito  
Santo, Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas.

1. Inovações tecnológicas. 2. Desenvolvimento sustentável. 3.  
Energia - Fontes alternativas. 4. Geração de energia fotovoltaica.  
5. Mercado de emissão de carbono. I. Dalcomuni, Sonia Maria. II.  
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências  
Jurídicas e Econômicas. III. Título.

CDU: 330

---

# A Transição Tecnológica rumo à Economia de baixo carbono: O papel da Energia Solar Fotovoltaica.

Paulo Henrique Assis Feitosa

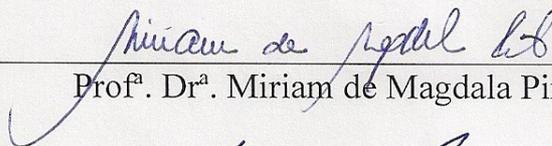
Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Economia.

Aprovada em 24 de maio de 2010 por:



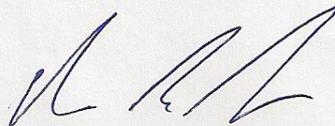
---

Profª. Drª. Sonia Maria Dalcomuni – Orientadora -UFES



---

Profª. Drª. Miriam de Magdala Pinto - UFES



---

Prof. Dr. Mauro Borges Lemos - UFMG

Esta Dissertação foi apoiada pelo “Programa de Capacitação de Recursos Humanos nos Cursos de Mestrado e Doutorado de Programas de pós-graduação *stricto sensu* do Estado do Espírito Santo” vinculado a Fundação de Apoio a Pesquisa do Espírito Santo da Secretaria de Estado de Ciência de Tecnologia do Governo do Estado do Espírito Santo.

*A duas paixões da minha vida,  
minha mãe, fonte eterna de  
inspiração, e Kellen, companheira  
em todos os momentos.*

## **AGRADECIMENTOS**

As contribuições que tornaram esta dissertação possível foram muitas e, sobretudo, indispensáveis. À Professora Sonia Dalcomuni, que mesmo com muitos questionamentos da minha parte, me proporcionou mais uma grande oportunidade de pesquisa, ao abrir meus olhos para o grande desafio que o tema representa e sua significância para os desdobramentos futuros do desenvolvimento econômico. Aos membros da banca pela disposição por aceitar contribuir para o desenvolvimento desta Dissertação, especialmente ao Professor Arlindo Villaschi, pela oportunidade de debates que foram decisivos para tornar este trabalho mais rico e maduro. Aos demais Professores do Mestrado, pela formação acadêmica nas áreas do conhecimento da Ciência Econômica. À minha Mãe, pelo amor incondicional e por figurar como maior exemplo de perseverança e determinação. À Kellen, pelo amor e companheirismo nas fases decisivas deste longo processo, sem sua presença essa tarefa teria sido muito mais difícil. A meus irmãos, pelo apoio e tolerância aos momentos de mau humor. Ao meu Pai, demais familiares e amigos pelo respeito a minha ausência. Aos colegas da FCAA e do Núcleo Cidades pelo apoio e compreensão. À Enaile e Fátima pelo pronto atendimento na revisão do texto. Meus agradecimentos estendem-se a todas as pessoas que ao longo desses dois anos, contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho. A todos o meu muito obrigado!

*“Perhaps, the destiny of man is to have a short, but fiery, exciting and extravagant life rather than a long, uneventful and vegetative existence”*  
**Nicholas Georgescu-Roegen, 1972.**

## **RESUMO**

O modelo de desenvolvimento econômico em curso desde a Revolução Industrial, ainda que tenha sido responsável pela melhoria da qualidade de vida da sociedade, resultou no acúmulo na atmosfera de uma quantidade de gases de efeito estufa suficiente para gerar mudanças globais no clima. Nesse contexto, a presente Dissertação propõe-se a analisar o papel da Energia Solar Fotovoltaica como uma das tecnologias que possibilitarão a transformação do sistema energético dominante. Tal análise iniciou-se pelo entendimento da transformação histórica da proposta de desenvolvimento sustentável a partir do ingresso do fator ambiental na agenda de pesquisa econômica. Nesse processo de transição, emergem desafios para alterar a trajetória tecnológica em curso, tendo em vista o aprisionamento ao sistema vigente. O redirecionamento a partir da difusão da tecnologia fotovoltaica, além dos mecanismos institucionais, exige uma abordagem setorial do sistema de inovação capaz de potencializar esforços no sentido de reduzir custos de produção e aumentar a eficiência dessa energia. A análise dessas questões constitui uma proposta para que a energia FV possa compor o esforço global para se alcançar uma economia de baixas emissões de carbono.

### **PALAVRAS-CHAVE:**

Inovações tecnológicas, Desenvolvimento sustentável, Energia – Fontes alternativas, Geração de energia fotovoltaica, Mercado de emissão de carbono.

## **ABSTRACT**

Although the economic development model that has been in force since the Industrial Revolution has been responsible for improving quality of life in our societies, it resulted in an accumulation of greenhouse gases in the atmosphere that is sufficient to cause global climate changes. In this setting, this dissertation aims at analyzing the role of Photovoltaic Solar Energy as one of the technological solutions that will allow the transformation of the current energy system. This analysis started from understanding the historical transformation that the sustainable development proposal has undergone since the introduction of the environmental issue in the economic research agenda. In this transition process, focusing on the imprisonment in the current system, some challenges to altering the technological course have emerged. Redirecting it based on the diffusion of photovoltaic technology requires a sectorial approach to the innovation system that could potentiate efforts in order to reduce production costs and increase energy efficiency. Analyzing these questions constitute a proposal for PV energy to assist in the global efforts to achieve a low carbon emission economy.

### **KEYWORDS:**

Technological innovations, sustainable development, Alternative Energy Sources, Photovoltaic energy generation, Carbon emission market.

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – FORMAS DE CRESCIMENTO E IMPACTOS .....	48
QUADRO 2 – IMPACTOS DECORRENTES DOS EVENTOS EXTREMOS DO TEMPO, CLIMA E NÍVEL DO OCEANO .....	52
QUADRO 3 – EXEMPLOS SELECIONADOS DE TECNOLOGIAS E POLÍTICAS PARA MITIGAÇÃO SETORIAL .....	55
QUADRO 4 – COMPARATIVO DA INTENSIDADE DE CARBONO NA ECONOMIA GLOBAL ENTRE 1990 E 2007 .....	60
QUADRO 5 – LINHA DO TEMPO DAS NEGOCIAÇÕES SOBRE MUDANÇA DO CLIMA .....	62
QUADRO 6 – ONDAS SUCESSIVAS DE MUDANÇA TÉCNICA.....	69
QUADRO 7 – CARACTERÍSTICAS DOS ANTIGOS E DOS NOVOS PROJETOS ORIENTADOS A UMA MISSÃO .....	86
QUADRO 8 – PRINCIPAIS OPÇÕES DE POLÍTICAS DE APOIO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	90
QUADRO 9 – FORMAS DE MECANISMOS INSTITUCIONAIS PARA SUPORTE À ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	92
QUADRO 10 – MECANISMOS INSTITUCIONAIS PARA SUPORTE A ENERGIA FV EM PAÍSES SELECIONADOS .....	93
QUADRO 11 – AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MECANISMOS DE APOIO PARA A ENERGIA FV.....	94
QUADRO 12 – TARIFAS <i>FEED-IN</i> NA ALEMANHA ENTRE 2004 E 2013 (EM CENTAVOS DE €/kWh) .....	96
QUADRO 13 – MAIORES SISTEMAS CENTRALIZADOS CONECTADOS A REDE .....	104
QUADRO 14 – EXEMPLOS DE APLICAÇÕES FOTOVOLTAICAS .....	105
QUADRO 15 – LINHA DO TEMPO DA TECNOLOGIA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	110
QUADRO 16 – TAXAS DE PROGRESSO PARA CÉLULAS FV NA LITERATURA.....	112
QUADRO 17 – EFICIÊNCIA DE MÓDULOS E CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....	114
QUADRO 18 – DESPESAS PÚBLICAS COM P&D EM 2008 NOS PAÍSES DO IEA-PVPS .....	115
QUADRO 19 – PERSPECTIVAS E QUESTÕES-CHAVE PARA O SILÍCIO CRISTALINO E OS <i>THIN-FILMS</i> .....	118
QUADRO 20 – PRIORIDADES PARA A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	119

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SISTEMA CRESCENDO DE FORMA AUTÔNOMA E LIMITADO PELOS RECURSOS NATURAIS.....	29
FIGURA 2 – ECONOMIA COMO SUBSISTEMA, À ESQUERDA “MUNDO VAZIO” E À DIRETA “MUNDO CHEIO” .....	33
FIGURA 3 – A CURVA DE CUSTO DE ABATIMENTO DE EMISSÕES.....	57
FIGURA 4 – HISTÓRICO DA RELAÇÃO CRESCIMENTO ECONÔMICO E EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	79
FIGURA 5 – CAPACIDADE FV INSTALADA ACUMULADA E NA UNIÃO EUROPEIA NO FINAL DE 2008. ....	101
FIGURA 6 – SISTEMA DISTRIBUÍDO CONECTADO À REDE NA CIDADE DE OTHA NO JAPÃO. ....	103
FIGURA 7 – <i>GRID-CONNECTED CENTRALIZED</i> EM <i>SOLARPARK WALDPOLENZ</i> , BRANDIS, ALEMANHA. ....	103
FIGURA 8 – CÉLULAS BASEADAS EM SILÍCIO MONOCRISTALINO, SILÍCIO POLICRISTALINO E OS <i>THIN FILMS</i> . ....	113
FIGURA 9 – SISTEMA DE INOVAÇÃO CHINÊS PARA TECNOLOGIA FV.....	127
FIGURA 10 – OPORTUNIDADES BRASILEIRAS NA CADEIA PRODUTIVA DA ENERGIA FV .....	131
FIGURA 11 – MAPA DE IRRADIAÇÃO SOLAR DO BRASIL PARA O PLANO INCLINADO. ....	133

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – DEMANDA POR ENERGIA PRIMÁRIA E PIB, 1971-2007.....	46
GRÁFICO 2 – MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL EM 2007 .....	50
GRÁFICO 3 – EMISSÕES ANTRÓPICAS DE GEE GLOBAIS EM 2004.....	52
GRÁFICO 4 – HISTÓRICO DA CAPACIDADE INSTALADA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA POR REGIÃO .....	100
GRÁFICO 5 – DIVISÃO DE TECNOLOGIAS POR CÉLULAS EM 2007.....	114
GRÁFICO 6 – DIVISÃO DA PRODUÇÃO GLOBAL DE CÉLULAS FV POR REGIÃO EM 2007 .....	126
GRÁFICO 7 – DIVISÃO DA PRODUÇÃO GLOBAL DE CÉLULAS FV POR EMPRESAS .....	128

## LISTA DE SIGLAS

CB-SOLAR	Centro Brasileiro para Desenvolvimento de Energia Solar Fotovoltaica
CCC	Copenhagen Consensus Center
CCJE	Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas
CCS	Carbon capture and storage
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CGEE	Centro de Gestão de Estudos Estratégicos
CMEPSP	Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
FRE	Fontes Renováveis de Energia
FV	Fotovoltaica
GDP	Gross Domestic Product
GEE	Gases de Efeito Estufa
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	International Energy Agency
IME	Instituto Militar de Engenharia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar
LEPTEN	Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia
MPPT	maximum power point tracker
MW	Megawatt
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PV	Photovoltaic
PVPS	Photovoltaic Power Systems Programme
REDD	Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação
SNI	Sistema Nacional de Inovação
SRES	Relatório Especial sobre Cenários de Emissão
SSI	Sistema Setorial de Inovação
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Chang
WEO	World Energy Outlook

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E CONSUMO ENERGÉTICO .....</b>	<b>22</b>
1.1 ASPECTOS TEÓRICOS E CONCEITUAIS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	23
1.1.1 <i>O processo de “ecologização” da economia .....</i>	<i>25</i>
1.1.2 <i>A evolução do conceito de desenvolvimento sustentável.....</i>	<i>34</i>
1.2 DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E EMISSÕES DE CARBONO.....	42
1.2.1 <i>A intensidade energética do crescimento econômico.....</i>	<i>44</i>
1.2.2 <i>A estrutura da demanda mundial de energia .....</i>	<i>49</i>
1.2.3 <i>O potencial de mitigação e abatimento de carbono.....</i>	<i>53</i>
1.2.4 <i>A questão das emissões no contexto internacional.....</i>	<i>58</i>
<b>2 ELEMENTOS PARA UMA TRAJETÓRIA TECNOLÓGICA SUSTENTÁVEL .....</b>	<b>66</b>
2.1 PARADIGMAS TECNOLÓGICOS E SISTEMAS ENERGÉTICOS: UMA INTERPRETAÇÃO PROPOSTA .....	66
2.1.1 <i>O aprisionamento lock-in do sistema energético.....</i>	<i>73</i>
2.1.2 <i>Os desafios da transição ao baixo carbono .....</i>	<i>78</i>
2.2 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA DIFUSÃO DE TECNOLOGIAS AMBIENTALMENTE FAVORÁVEIS .....	83
2.2.1 <i>Mecanismos institucionais e estratégias de desenvolvimento de FV.....</i>	<i>91</i>
2.2.2 <i>O mercado mundial de energia solar fotovoltaica .....</i>	<i>100</i>
<b>3 DINÂMICA TECNOLÓGICA E O SISTEMA SETORIAL DE INOVAÇÃO .....</b>	<b>108</b>
3.1 ASPECTOS TECNOLÓGICOS E OS INVESTIMENTOS EM P&D .....	109
3.2 AS ESPECIFICIDADES DO SISTEMA SETORIAL DE INOVAÇÃO .....	120
3.3 AMEAÇAS E OPORTUNIDADES PARA ENERGIA FV NO BRASIL .....	130
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>136</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>139</b>

## INTRODUÇÃO

O estudo da história da humanidade no período recente nos revela que o processo iniciado na primeira Revolução Industrial modificou, tanto na sua escala quanto na sua intensidade, a capacidade do homem de transformar o meio ambiente. A pervarsidade das longas ondas de desenvolvimento transformou a paisagem do planeta, a organização da sociedade e a forma de relacionamento dos indivíduos. Nos dias atuais, as repercussões destas transformações são amplas, distintas, complexas e contraditórias sendo que o foco de maior atenção está na capacidade das ações antrópicas de transformarem o ambiente natural de forma irreversível.

O referido processo de transformação foi indispensável para a garantia de uma melhor qualidade de vida para a sociedade. Entretanto, parte desta melhoria resultou no acúmulo, na atmosfera, de uma quantidade de gases causadores do efeito estufa suficiente para gerar mudanças globais no clima. Mesmo que as mudanças no clima não sejam a única forma de avaliar as externalidades negativas das atitudes humanas no meio ambiente, é preciso considerar os efeitos catastróficos destas mudanças que colocam em risco as condições mínimas de sobrevivência de seres vivos na terra.

Dos diversos gases causadores do efeito estufa, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) destaca-se como um de seus maiores responsáveis, estando intimamente relacionado com o consumo de energia, resultante dos processos relacionados à atividade econômica. Nessa circunstância é que se destaca o potencial das fontes renováveis de energia – FRE em melhorar a qualidade da relação meio ambiente e seres humanos e da energia solar fotovoltaica – FV dado seu potencial de mitigação e abatimento de emissões e pela ampla gama de possibilidades de aplicações a partir de inovações tecnológicas.

Neste contexto preliminar, a presente Dissertação – *A Transição Tecnológica Rumo a Economia de Baixo Carbono: o papel da energia solar fotovoltaica* – se propõe, fundamentalmente, a “compreender o ambiente econômico e institucional da participação da energia solar fotovoltaica no processo de transição tecnológica rumo a uma economia de baixo carbono”.

A partir desta proposição, definiu-se a transição para uma economia de baixo carbono como o nome de batismo tardio para um processo que já dura aproximadamente quarenta anos. Nesse período uma série de eventos isolados, e eventualmente interconectados, transformou a forma com que a sociedade percebe sua relação com o meio ambiente e consolidou a noção de desenvolvimento sustentável que norteia novas formas de ações individuais e coletivas.

O processo de transição para uma economia de baixo carbono vem ocorrendo em diversos níveis da sociedade com repercussões numa ampla gama de atividades econômicas e exige o tratamento adequado de questões que envolvem e relacionam ciência e tecnologia para soluções que permitam transfigurar o “modelo fóssil” de produção capitalista recente. Neste esforço global de transição tecnológica, é preciso avaliar qual o potencial da energia solar FV na mitigação e no abatimento de emissões de carbono e suas possibilidades de aplicação.

Uma das justificativas fundamentais a favor da fonte de energia FV tem como base o fato da reprodução material da humanidade na Terra ser abastecida por duas formas básicas: os estoques terrestres de minerais e energia, limitados em quantidade total, com utilização facultativa pelo ser humano; e o fluxo solar, ilimitado em escala terrestre de tempo e responsável pela manutenção da vida na Terra. Das alternativas existentes, a oferta ilimitada de energia solar precisa ser considerada em qualquer modelo de desenvolvimento econômico que se proponha a ser sustentável, percebendo o mecanismo FV como um importante recurso tecnológico deste progresso<sup>1</sup>.

Para uma abordagem das questões que são determinantes da transição para este novo modelo, será preciso um arcabouço teórico adequado para tratar das implicações econômicas da difusão desta tecnologia dentro da dinâmica dos mais diversos setores da economia. Desta forma, compreenderemos os mecanismos institucionais utilizados, e como estão contextualizados no conjunto de estratégias para o seu desenvolvimento.

---

<sup>1</sup> Documentos internacionais identificados pelo CGEE afirmam que 50% do total da geração de energia no mundo em 2050 virão de fontes renováveis, desse total 25% serão supridos pela energia FV. Já no fim do século, o mundo dependerá em até 90% das FRE, dos quais 70% serão de energia FV.

Diante do desafio de tornar a produção desta energia competitiva em relação às demais fontes convencionais, busca-se uma análise integrada do seu setor, analisando sua estrutura básica e sua dinâmica tecnológica. Essa proposta de análise procura um melhor diagnóstico da estrutura setorial, dos limites e transformações dos agentes e suas interações, para identificação dos fatores que afetam a inovação.

A pesquisa bibliográfica realizada identificou diversos trabalhos acadêmicos que se aproximam da abordagem proposta neste trabalho. No nível estadual, foram identificados o projeto de graduação de Brito (2007), que trata dos critérios e impactos na rede elétrica de sistemas distribuídos, e a tese de doutoramento em andamento de Costa (2004), sobre controlador preditivo para MPPT de sistemas fotovoltaicos, ambos desenvolvidos no Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da UFES. Já no Mestrado em Economia do Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas, da mesma universidade, destaca-se a dissertação de Bragato (2002), que destacou a fonte solar como alternativa na geração de energia elétrica e seus aspectos ambientais.

No âmbito nacional, destacam-se os trabalhos de Fontoura (2002) que demonstra a necessidade de criação de mecanismos para garantia da qualidade do fornecimento de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos na Bahia; Rodriguez (2002) que avalia e discute a influência de diversas formas de incentivo na viabilidade dos sistemas fotovoltaicos conectados a rede; Silva (2006) analisa os motivos que levaram companhias de petróleo a investir em energias renováveis, mais especificamente a solar fotovoltaica, e como a Petrobras poderia se beneficiar; Costa (2006) observa os instrumentos de política adotados internacionalmente para maior participação de fontes novas de energia renovável para geração de energia elétrica na matriz brasileira; Simioni (2006) apresentou algumas possíveis razões que impedem uma maior participação de fontes de energia, incluindo a solar fotovoltaica; e finalmente Salamoni (2009) que desenvolve um conjunto de recomendações para viabilizar e facilitar a inserção da tecnologia FV conectada à rede elétrica no Brasil.

O trabalho de Salamoni (2009) é o mais próximo do escopo desta Dissertação, dentre um conjunto de esforços realizado pelo Labsolar, que foi responsável pela publicação

de quarenta e seis dissertações de mestrado e treze teses de doutorado específicas na área de energia solar<sup>2</sup>. Análogo ao trabalho desenvolvido pelo Lepten/Labsolar é possível identificar dezenas de teses e dissertações produzidas em instituições nacionais que tratam o assunto a partir de uma abordagem técnica da energia solar. Entretanto são escassos os trabalhos nas ciências sociais aplicadas, mais especificamente na ciência econômica. A partir do exposto, acredita-se que o presente trabalho possibilitará de forma pioneira a discussão sobre os desafios tecnológicos da promoção de energia FV na forma de uma das potenciais tecnologias que possibilitarão a transição para a economia de baixo carbono.

As demais publicações nacionais e internacionais, na forma de artigos científicos, serão apresentadas ao longo do texto, como subsídio para a construção das idéias, conceitos e argumentos expostos nesta dissertação.

No que se refere à definição do referencial teórico, entendemos que a complexidade dos temas analisados nesta dissertação e suas repercussões em escala global garantem as possibilidades de utilização de diversas abordagens teóricas, inclusive métodos teóricos convencionais de análise econômica. Entretanto, a identificação da necessidade de uma abordagem sistêmica do direcionamento do avanço econômico, ao destacar o papel crucial da mudança técnica, revela a limitada capacidade do modelo teórico ortodoxo convencional<sup>3</sup> para tratar as referidas questões em profundidade. Essa limitação é constatada quando se percebe no modelo tradicional de análise o progresso técnico como um fenômeno exógeno ao funcionamento do mercado, além de tratar de sua dinâmica sem fazer relação com o comportamento das firmas ou com a estrutura de mercado.

---

<sup>2</sup> Vinculado ao Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN) da UFSC. Disponível em: <<http://www.lepten.ufsc.br>>. Acesso em 12 abr. 2010.

<sup>3</sup> Definido como um conjunto de atributos comuns na perspectiva intelectual e na abordagem científica que une uma série de economistas, representada por meio de formalizações e interpretações modernas da tradição mais ampla do pensamento econômico descendente intelectualmente de Smith e Ricardo a partir de Mill, Marshall e Walras. Trata-se de um método teórico preocupado diretamente com a análise econômica e apenas indiretamente com qualquer questão de substância específica (NELSON; WINTER, 1982, p. 6-7).

Também conhecida como abordagem neoclássica, o método de análise convencional, baseado em um formalismo, orienta as pesquisas de diferentes economistas ao redor do mundo. A abordagem em questão falha ao fornecer uma estrutura teórica totalmente inadequada para a observação da mudança técnica, principal elemento teórico na análise da transição tecnológica para uma economia de baixo carbono, objeto principal da presente pesquisa.

A apresentação de uma alternativa ao método ortodoxo convencional não é ocasional e se contextualiza em um conjunto de esforços que justificam a necessidade de um importante deslocamento da orientação teórica sobre diversos temas e premissas. Dessa maneira, parte da construção do referencial adotado consiste em explicar os motivos do rompimento com o método convencional de análise econômica, se desdobrando em dois movimentos, um que aponte as deficiências da teoria convencional e outro que justifique a constituição da teoria alternativa.

A ortodoxia manifesta-se em variados níveis e expõe uma variedade de forças e deficiências, algumas corrigidas em tratamentos avançados e outras simplesmente encobertas pela própria teoria. Essas deficiências foram extensamente analisadas por Nelson e Winter na obra “*An Evolutionary Theory of Economic Change*”, que argumenta a favor de grandes reconstruções dos fundamentos da teoria convencional, para sobrepujar pressupostos extremamente simplificadores como informação perfeita e equilíbrio estático, incluindo uma maior atenção às mudanças de longo prazo.

[...] Many of our criticisms of orthodox analysis are familiar enough, at least within the individual theoretical contexts to which they refer. Less familiar, and more controversial, is our suggestion that the difficulties of such analysis are largely a reflection of fundamental limitations arising from orthodoxy's canonical assumptions of profit maximizations and equilibrium (NELSON; WINTER, 1982, p. 30).

A alternativa ao método ortodoxo convencional teve como referencial analítico principal as contribuições teóricas de Joseph Schumpeter, desenvolvidas nas obras *Teoria do Desenvolvimento Econômico (1911)* e *Capitalismo, Socialismo e Democracia (1942)* e sua base teórica contribuirá indiretamente para o presente trabalho, tendo em vista a necessidade de aportes mais específicos. Implicitamente, sua contribuição consiste na

ampliação do entendimento do processo de mudança técnica como meio para se alcançar a evolução do capitalismo, a procura por lucro e a importância da transformação da situação estática em um processo de dinâmica econômica. Dessa forma, o desenvolvimento socioeconômico de Schumpeter é caracterizado pelo contínuo processo de destruição criativa, no qual a própria dinâmica econômica tem como catalisadores básicos a introdução e a generalização das inovações tecnológicas.

[...] revoluciona a estrutura econômica a partir de dentro, incessantemente destruindo a velha, incessantemente criando uma nova. Esse processo de Destruição Criativa é o fato essencial acerca do capitalismo e é aí que têm de viver todas as empresas capitalistas (SCHUMPETER, 1984, p. 40).

A influência de Schumpeter foi tão abrangente que deixou diversos herdeiros de sua teoria como os autores Rosenberg, Freeman, Pavitt, Nelson e Winter, estudiosos da mudança técnica em diversos níveis, sob a designação de neo-schumpeterianos. Ainda que o presente trabalho não pretenda revisar toda sua teoria subjacente, os desenvolvimentos teóricos que guardam relação com as questões analisadas serão revistos ao longo dos capítulos como referencial teórico e metodológico.

A atenção aos processos de mudanças de longo prazo foram os pilares da constituição de uma “teoria evolucionária” no sentido das idéias básicas da biologia, pois o mercado pode ser considerado um ambiente de “seleção natural” econômica de firmas promissoras capazes de sobreviver e crescer.

Our use of the term “evolutionary theory” to describe our alternative to orthodoxy also requires some discussion. It is above all a signal that we have borrowed basic ideas from biology [...]. Market environments provide a definition of success for business firms, and that definition is very closely related to their ability to survive and grow (NELSON; WINTER, 1982, p. 9).

Para a teoria evolucionária, as regularidades do sistema econômico não são interpretadas como soluções de um problema estático, mas como resultado de processos dinâmicos, como “*the increasing acceptance of the cosmological theory of Big Bang, a conception that regards all of known reality as the continuously evolving consequence of one great antecedent event*” (NELSON; WINTER, 1982, p. 10). Em níveis menos cósmicos, a análise de questões complexas, como as mudanças climáticas a partir de equilíbrios harmoniosos, faz com que a teoria econômica convencional pareça ligeiramente anacrônica.

Na forma de modelo alternativo, surgem incompatibilidades entre a teoria ortodoxa e a evolucionária. Em primeiro lugar as firmas do modelo evolucionário são guiadas pelo lucro e comprometidas com a busca pelo aprimoramento dos lucros, mas não se supõe que suas ações sejam maximizadoras de lucros em um conjunto de escolhas bem definidas e dadas. Em segundo, existem tendências das firmas mais lucrativas expulsarem as menos lucrativas, mas a teoria não focaliza a análise em hipotéticos estados de “*industry equilibrium*” em que todas as firmas não-lucrativas desaparecem e as lucrativas tem o tamanho desejado (NELSON; WINTER, 1982, p. 53-59).

Para melhor analisar o tema, a presente Dissertação foi dividida em três capítulos. O primeiro capítulo – *Desenvolvimento Sustentável e Consumo Energético* – tem como “plano de fundo” os desafios da sociedade atual na relação desenvolvimento e meio ambiente, a partir da discussão do ingresso do fator ambiental na agenda de pesquisa da ciência econômica e seus rebatimentos na formalização do conceito de desenvolvimento sustentável. Para analisar a relação existente entre desenvolvimento econômico e consumo de energia, tratamos da estrutura do sistema energético e seus problemas de emissões de GEE e o potencial de mitigação de abatimento de carbono de tecnologias como a FV, e a sua contextualização no plano internacional.

O segundo capítulo – *Elementos para uma Trajetória Tecnológica Sustentável* – aborda as principais contribuições da teoria econômica da inovação com ênfase evolucionária para a questão ambiente e desenvolvimento. Nesse capítulo, são avaliados os desafios das políticas científicas e tecnológicas e a evolução dos sistemas energéticos no contexto dos paradigmas tecnológicos. São discutidas as possibilidades de difusão da tecnologia FV a partir dos mecanismos institucionais e analisadas as oportunidades geradas no mercado mundial de energia FV.

No capítulo terceiro – *Dinâmica Tecnológica e o Sistema Setorial de Inovação* – tem como objetivo compreender aspectos tecnológicos da energia FV, analisar os investimentos em P&D e compreender as especificidades do sistema setorial de inovação com o objetivo de potencializar os esforços dentro de uma estrutura requerida para rápida difusão e inserção da energia FV.

## **CAPÍTULO 1**

### **DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E CONSUMO ENERGÉTICO**

Os desafios da sociedade atual na relação desenvolvimento e meio ambiente exigem uma revolução que traga consigo uma nova forma de enxergar o mundo, e requer a definição de novos parâmetros, formas e padrões para se ter uma idéia exata do que se propõe ser um desenvolvimento sustentável.

O objetivo deste capítulo para o trabalho como um todo consiste em contextualizar o debate sobre os desafios para se alcançar um modelo de desenvolvimento que seja capaz de reduzir externalidades negativas ao meio ambiente. Para este debate examinamos a literatura que demonstrou o descaso da Ciência Econômica com a questão ambiental e suscitou a revisão de pressupostos teórico-metodológicos da abordagem convencional.

Diante de uma matriz energética baseada em recursos fósseis, busca-se compreender como a existência de uma forte relação entre crescimento econômico e consumo de energia, resultam em um processo de acúmulo de Gases de Efeito Estufa – GEE na atmosfera e em mudanças climáticas globais. Considerando o consumo energético um bem indispensável para melhoria da qualidade de vida e bem estar da sociedade, a análise qualitativa da questão energética conduz a uma reavaliação do modo de vida e padrões de consumo.

Considerando que algum nível de consumo de energia é indispensável para garantia de desenvolvimento econômico, analisa-se quais as possibilidades de mitigação de emissões e os custos de abatimento de GEE. Este debate precederá uma discussão sobre o desafio de encontrar um mecanismo para monitorar o desenvolvimento sustentável em escala global e a inserção deste debate no contexto internacional.

### **1.1 Aspectos teóricos e conceituais do desenvolvimento sustentável**

A partir da década de 1960, os debates travados em meios políticos, sociais e acadêmicos, acerca dos danos ambientais provocados pelo vigoroso desenvolvimento econômico fizeram com que a energia, os recursos naturais e o ambiente como um todo se transformassem em temas de importância econômica, política e social.

A análise do período em questão terá como base a estruturação original e reexaminada por Dalcomuni (1997, p. 18; 2006, p. 49-56), que se mostrou mais adequada na construção dos argumentos desta dissertação e que identificou um consenso na literatura econômica, ao classificar quatro períodos de ‘vales e cumes’ de conscientização ambiental, quais sejam: anterior a década de 1960; da década de 1960 até início dos anos 1970; do início dos anos 1970 até meados dos anos 1980; e desde meados dos anos 1980 até meados de 1990.

No período anterior a 1960, observa-se a atenção das ciências econômicas nas questões concernentes ao crescimento econômico, logo uma ínfima ou inexistente preocupação com questões ambientais. A partir da metade de década de 1960 até início dos anos 1970, é observado o início de uma intensa atenção para as questões ambientais no contexto da publicação do relatório intitulado “Limites ao Crescimento”.

Os eventos relacionados aos choques do petróleo da década de 1970 resultaram na redução do ritmo de crescimento econômico e conseqüentemente das preocupações com questões ambientais. Naquele momento o foco das atenções passou a ser a viabilidade de geração de emprego e renda. Com a superação da crise do petróleo e a retomada do crescimento econômico, em meados na década de 1980, temos a volta revigorada de uma conscientização ambiental que dura até os dias atuais.

Como exposto, até a década de 1960, a abordagem econômica deste debate foi desenvolvida sem a devida relevância<sup>4</sup> até aquele momento, pois a ciência econômica

---

<sup>4</sup> Sem considerar os trabalhos que foram base para desenvolvimentos posteriores como os de Arthur Pigou (1920) que desenvolveu uma teoria para lidar com a escassez de recursos ambientais para se alcançar um equilíbrio entre os interesses de quem pretender explorar e os que pretendem desfrutar do

concentrava muitos esforços no sentido de desenvolver uma teoria do crescimento e como alcançar e sustentar o crescimento econômico. Especialmente durante a década de 1950, esse crescimento foi conduzido por uma rápida expansão industrial sem enfrentar preocupações ou pressões significativas do seu impacto sobre o ambiente natural (DALCOMUNI, 1997, p. 18).

A partir da década de 1960, o acelerado crescimento industrial da década anterior, resultou num aumento da sensibilização da sociedade, quanto aos efeitos negativos do crescimento industrial ao ambiente natural. Um exemplo dessa sensibilização é o aumento, sem precedentes, da demanda por regulação ambiental das operações industriais e o número de itens. Especialmente nos Estados Unidos, a atividade reguladora do Governo situou-se em níveis historicamente elevados (ROTHWELL, 1992, apud DALCOMUNI, 1997, p. 18).

Do ponto de vista da literatura específica, no período anterior a 1960, não havia uma dissociação clara entre publicações de economia/negócios e os relacionados ao meio ambiente. Nesse contexto, a intensa regulação e debate resultaram num aumento das publicações que relacionam questões ambientais e econômicas. A literatura existente na época pode ser dividida, a partir de Dalcomuni (1997, p. 19), em três grupos principais:

- a) O grupo de publicações de ambientalistas que defendem a tese de crescimento zero, em que o diagnóstico do movimento causador da degradação do ambiente natural é o crescimento econômico. Consequentemente, para frear a degradação ambiental as políticas devem objetivar o "não crescimento" (JACOBS, 1991, apud DALCOMUNI, 1997).
- b) As publicações de negócios sobre as influências da regulação nas empresas, dominada por publicações de firmas de consultoria, em que a idéia principal era reforçar a influência negativa da regulação em matéria de inovação das

---

meio ambiente e os trabalhos do economista norte-americano Harold Hotelling (1930) que desenvolveu uma teoria da utilização ideal de tais recursos com base em um equilíbrio entre as necessidades presentes e futuras (DALCOMUNI 1997, p. 23-25).

empresas e um fundamento para a desregulação. Com foco especial na indústria farmacêutica e na indústria química, ampla variedade de dados foram apresentados sobre os efeitos nocivos da regulação sobre as atividades de inovação por parte das empresas.

- c) A literatura econômica sobre o meio ambiente, como resultado do movimento ambientalista do final dos anos 1960 e início dos anos 1970, em que os economistas também começaram a estudar os problemas ambientais relacionados de uma forma mais sistemática, iniciando o domínio da economia ambiental ou verde (MARKANDYA, s.d., apud DALCOMUNI, 1997).

O amplo entendimento das complexas relações entre economia e meio ambiente, exige fundamentalmente a revisão de cada um dos grupos expostos. Entretanto a delimitação do escopo proposto para o presente trabalho, estabelece um foco no último grupo de literatura, por focar a economia no sentido de analisar de forma mais sistemática os problemas ambientais, o que resultou na consolidação de um processo conhecido como “ecologização” da economia.

### **1.1.1 O processo de “ecologização” da economia**

Em termos teórico-metodológicos, o processo de “ecologização” da economia, foi constituído por diversos trabalhos que tiveram forte impacto nos meios acadêmico e ambientalista, desenvolvidos por autores como Kennedy Boulding (1910-1993), Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994), e Herman Daly (1938–). A partir de teses como “*economics of coming spaceship earth*”, “*entropy law and the economic process*” e “*steady state*”, buscava-se imprimir um caráter científico às pesquisas nessa área e um modelo analítico alternativo que pudesse prevenir catástrofes ambientais iminentes, considerando as necessidades potenciais das gerações futuras.

Os trabalhos do inglês, radicado nos Estados Unidos, Kenneth Boulding (1966), contribuíram para a constituição de uma teoria geral dos sistemas, enfatizando a natureza como a base material que sustenta o processo, além de constituir um marco para o conjunto de autores que o sucederam. Especificamente, na obra *The Economics*

of *Coming Spaceship Earth* (1966), Boulding afirma que ao longo da história do homem sempre existiu algum lugar além dos limites conhecidos da ocupação humana. Em outras palavras, o homem sempre teve para onde ir quando as coisas ficavam muito difíceis, quer em razão da deterioração do ambiente natural ou da degeneração da estrutura social. Gradualmente, os eventos históricos mostraram ao homem que, na verdade, o planeta Terra era esférico e fechado para a atividade humana nômade. Esses limites foram ilustrados com a comparação da Terra com uma nave espacial, ressaltando o fato de nosso planeta ter uma capacidade limitada em termos de seus recursos naturais e de absorver resíduos. Sobre essa noção de limite na análise econômica, o autor destaca:

Economists in particular, for the most part, have failed to come to grips with the ultimate consequences of the transition from the open to the closed earth. One hesitates to use the terms "open" and "closed" in this connection, as they have been used with so many different shades of meaning. Nevertheless, it is hard to find equivalents (BOULDING, 1966, p. 3).

A idéia de “*closed earth*” do futuro exige que princípios econômicos sejam diferentes do “*open earth*” do passado. Para exemplificar esta diferença, Boulding (1966) chama a economia aberta de “economia do cowboy”, que simboliza o domínio de novas fronteiras e a exploração de novos recursos e planícies ilimitadas, associada ao comportamento imprudente e agressivo. Na economia do cowboy o objetivo principal é o consumo e a produção, sendo o sucesso da economia medido pela taxa de transferência dos fatores de produção. Do outro lado, a economia fechada do futuro poderia igualmente ser denominada como “economia do astronauta”, que entende o planeta como uma única nave, que representa um reservatório limitado para extração ou poluição. Portanto, nessa economia o homem deve encontrar seu lugar em um sistema cíclico ecológico com entradas de energia e reprodução material contínuas.

Para Boulding (1966), no futuro não existirá um caminho alternativo, e a economia deverá ser vista como um sistema circular, autorrenovável em termos materiais e aberto apenas em termos energéticos. Diante da constatação, torna-se necessário o aproveitamento econômico da energia solar, detentora de grande potencial de abastecimento em substituição à natureza esgotável das fontes convencionais. Sobre a

utilização da energia solar, ainda que existam limitações tecnológicas para sua utilização, o autor acredita que são elevadas as possibilidades de melhorias substanciais no futuro.

From the point of view of the energy system, the econosphere involves inputs of available energy in the form, say, of water power, fossil fuels, or sunlight, which are necessary in order to create the material throughput and to move matter from the noneconomic set into the economic set or even out of it again; and energy itself is given off by the system in a less available form, mostly in the form of heat.

These inputs of available energy must come either from the sun (the energy supplied by other stars being assumed to be negligible) or it may come from the earth itself, either through its internal heat or through its energy of rotation or other motions, which generate, for instance, the energy of the tides. Agriculture, a few solar machines, and water power use the current available energy income. In advanced societies this is supplemented very extensively by the use of fossil fuels, which represent as it were a capital stock of stored-up sunshine.

Because of this capital stock of energy, we have been able to maintain an energy input into the system, particularly over the last two centuries, much larger than we would have been able to do with existing techniques if we had had to rely on the current input of available energy from the sun or the earth itself. This supplementary input, however, is by its very nature exhaustible" (BOULDING, 1966, p 3-4).

Outra importante contribuição de Boulding (1966) pode ser notada ao aplicar a termodinâmica<sup>5</sup>, para a análise do uso do ambiente natural, que o levou a conclusão de que todo o consumo gera a mesma quantidade de resíduos, embora em formas modificadas. E como resultado da Segunda Lei da Termodinâmica, a Lei da Entropia<sup>6</sup>, a matéria já utilizada na produção de bens é cada vez mais dissipada, não podendo ser inteiramente recuperada na sua forma original.

Como toda transformação energética envolve produção de calor que tende a se dissipar, a partir da essência da Lei da Entropia, temos que a degradação energética tende a atingir seu máximo em um sistema isolado como o universo, considerando que o calor tende a se dissipar uniformemente pelo sistema, o que impede seu aproveitamento para gerar trabalho. Como as diversas formas de energia são sistemas

---

<sup>5</sup> Estuda os efeitos da mudança em temperatura, pressão e volume em sistemas físicos.

<sup>6</sup> Segunda lei da Termodinâmica, afirma que toda transformação energética envolve produção de calor e tende a se dissipar, considerando o calor como a forma mais degradada de energia, pois ainda que parte dele possa ser aproveitada para algum propósito, não é possível aproveitá-lo totalmente por causa de sua dissipação (VEIGA, 2009, p. 62).

abertos, elas só se mantêm como oposição ao entrópico. Em outras palavras, os organismos vivos existem, crescem e se organizam importando de fora de seus corpos energia e matéria de qualidade e exportando a entropia. A economia como sistema não é diferente, funciona aberta para a entrada de energia e materiais de qualidade, mas também para saída de resíduos, se alimentando de energia e matéria de baixa entropia e gerando subprodutos na forma resíduos de alta entropia (VEIGA, 2009, p. 62).

No mesmo ano da importante publicação de Boulding, o romeno, também radicado nos Estados Unidos Nicholas Georgescu-Roegen, a partir de uma coletânea de artigos científicos sobre a teoria do consumidor chamada *Analytical Economics*, demonstrou que a abordagem tradicional da produção, que é base das teorias do crescimento econômico, viola as leis da termodinâmica, especialmente a Lei da Entropia (GEORGESCU-ROEGEN, 1986).

Essa coletânea foi uma espécie de esboço do que anos mais tarde seria desenvolvido com mais rigor na obra *The Entropy Law and the Economic Process* (1971), que demonstrou a estreita relação entre as ciências físicas e econômicas, ressaltando os aspectos termodinâmicos do processo econômico, além de obrigar profundas revisões no corpo teórico convencional, ao introduzir a idéia de irreversibilidade e limites na teoria econômica como resultado da Lei da Entropia, contrapondo a teoria econômica tradicional que se baseia na Primeira Lei da Termodinâmica<sup>7</sup> sobre a transformação da matéria (GEORGESCU-ROEGEN, 1999).

A tese de Georgescu-Roegen contradiz o modelo neoclássico de análise econômica, que resume o meio ambiente como uma alocação intertemporal de recursos entre consumo e investimento por meio de agentes econômicos dotados de racionalidade substantiva e que objetivam maximizar sua utilidade. Se considerarmos os pressupostos do modelo convencional, os recursos ambientais passam a não representar um limite absoluto à expansão da economia no longo prazo.

---

<sup>7</sup> Também conhecida como lei de conservação da energia, afirma que a energia total transferida para um sistema é igual à variação da sua energia interna.

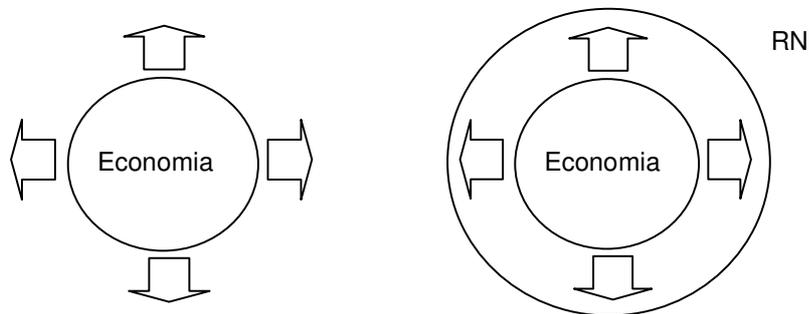


Figura 1 – Sistema crescendo de forma autônoma e limitado pelos recursos naturais  
 Fonte: ROMEIRO, 2003, p. 8.

As referidas contradições fizeram com que a teoria neoclássica voltasse a dar respostas a essas questões, concentrando-se em dois argumentos. O primeiro afirma que os recursos ambientais não viriam a se constituir em limites efetivos absolutos ao funcionamento do sistema econômico, uma vez que a escassez crescente induziria inovações tecnológicas capazes de superar tais restrições. O segundo considera que os danos ambientais deveriam ser vistos em termos de custos sociais efetivamente percebidos na forma de externalidades que deveriam ser internalizados no cálculo econômico do agente gerador do dano. Com isso a teoria neoclássica inverteu a lógica da pauta da agenda ambiental, ao afirmar que não são os critérios científico-ambientais que regulam e determinam a atividade econômica, mas os critérios econômicos que devem orientar a utilização dos recursos ambientais, através da valoração ambiental.

A partir do pressuposto de que o único fator limitante do progresso econômico é a natureza e o planeta é finito e materialmente fechado, Georgescu-Roegen conclui que a economia não pode crescer indefinidamente ou mesmo mantenha seu tamanho. Na hipotética situação em que uma economia dependesse inteiramente da utilização da radiação solar e reciclasse os materiais usados no processo de transformação industrial, em tese, operaria num ciclo fechado. Entretanto, isso implicaria supor que todos os minérios são recursos renováveis, e na prática não é possível a reciclagem total dos materiais (GEORGESCU-ROEGEN, 1999).

Na hipótese do ciclo fechado, o mesmo autor faz uma distinção fundamental entre duas fontes de baixa entropia acessíveis ao homem: uma é o estoque de matéria e energia

dos depósitos minerais terrestres e outro é o fluxo de radiação solar. Se considerarmos a finitude dos estoques terrestre de baixa entropia, constata-se que representam o elemento mais crítico. Entretanto, a pressão sobre os estoques de baixa entropia fará com que o homem concentre esforços no sentido de fazer maior uso da energia solar, levando-o a descobrir meios de transformar radiação solar diretamente em força motriz. Entre as considerações elencadas por Georgescu-Roegen (1975), acerca da utilização da energia solar, podemos observar:

- a) A energia solar é fluxo e não um estoque, sendo que sua intensidade está totalmente fora do nosso controle;
- b) Enquanto o uso atual dos estoques terrestres de energia compromete a sua igual utilização pelas gerações futuras, no caso da energia solar as gerações futuras ainda terão sua parte inalienável de utilização;
- c) Existe uma diferença astronômica entre o montante do fluxo de energia solar e o tamanho do estoque de energia livre terrestre, e o fato adicional de que o sol continuará a brilhar com praticamente a mesma intensidade por outros cinco bilhões de anos;
- d) Do ponto de vista da utilização industrial, a energia solar tem uma imensa desvantagem em comparação com a energia de origem terrestre. Esta última está disponível em uma forma concentrada, que nos permite obter quase instantaneamente uma enorme quantidade de trabalho. Em contraste, o fluxo de energia solar chega até nós com uma intensidade muito baixa, como uma chuva muito fina, quase uma névoa microscópica;
- e) A energia solar tem uma vantagem única e incomensurável, enquanto o uso de qualquer energia terrestre produz alguma poluição nociva, a utilização da energia solar é livre de poluição, visto que, se esta energia é utilizada ou não, o seu destino final é o mesmo, ou seja, tornar-se o calor dissipado que mantém o equilíbrio termodinâmico entre o planeta e o espaço, a uma temperatura propícia.
- f) O fato elementar de o que a sobrevivência de cada espécie na Terra depende, direta ou indiretamente da radiação solar. Neste contexto só o homem também depende dos recursos minerais, que para sua utilização concorre como nenhuma

outra espécie, colocando em risco outras muitas formas de vida, inclusive a própria.

De modo conclusivo, Georgescu-Roegen entende que a entropia dos processos é um fenômeno inflexível, pois o crescimento econômico material deteriora sua base física, não podendo ser mantida de forma sustentável, e o máximo que pode ser feito é retardar esse colapso com uma forma mais racional de emprego dos recursos naturais. Portanto, o processo econômico será necessariamente declinante a partir de determinado momento, por mais remoto que possa estar o início desta tendência<sup>8</sup>.

De forma alternativa às conclusões de Georgescu-Roegen, emergem das pesquisas de um de seus principais alunos, Herman Daly, o resgate da idéia de “*stationary state*” de John Stuart Mill, em que capital e trabalho tenderiam a parar de crescer e se manteriam constantes. A interpretação deste termo gerou confusão depois que economistas neoclássicos o redefiniram como sendo um estado em que a tecnologia e as preferências são constantes, e que o capital e a população poderiam continuar crescendo.

Com o intuito de evitar desentendimentos Daly passou a adotar o termo de origem nas ciências físicas e biológicas “*steady state*” entendido como situação em que a quantidade de recursos da natureza utilizada seria suficiente apenas para manter constante o capital e a população, e os recursos primários só seriam usados para melhorar qualitativamente os bens de capital.

A steady-state economy is defined by constant stocks of physical wealth (artifacts) and a constant population, each maintained at some chosen, desirable level by a low rate of throughput-i.e., by low birth rates equal to low death rates and by low physical production rates equal to low physical depreciation rates, so that longevity of people and durability of physical stocks are high (DALY, 1974, p. 15).

---

<sup>8</sup> Dado o caráter inevitável do decrescimento, consequência da limitação material da terra, Georgescu-Roegen propõe que esse processo fosse voluntariamente iniciado, em vez de vir em decorrência da escassez de recursos. E quanto mais cedo começar tal recolhimento da economia, maior será a sobrevida da atividade econômica da espécie humana (VEIGA, 2009, p. 64-65).

Se o custo de manter os estoques, começa com a extração de recursos de baixa entropia na entrada e termina com a mesma quantidade de resíduos de alta entropia (poluição) na saída, o fluxo de *throughput* é o custo inevitável de manter os estoques de pessoas e artefatos, devendo ser minimizados e, portanto, sujeitos à manutenção de um nível desejado de estoques.

Já os serviços, gerados pelas ações de artefatos e pessoas, ocorrem em benefício da atividade econômica e o estoque de riqueza física é um fluxo acumulado de rendimento *throughput* e, portanto, em última análise, também um custo. A eficiência final segundo Daly (1974, p. 15) “[...] is the ratio of service to throughput. But to yield a service, the throughput flow must be first accumulated into stocks even if of short duration”, é expressa pela seguinte equação:

$$Eficiência\ Final = \frac{Serviço^{(1)}}{Throughput} = \frac{Serviço^{(2)}}{Estoque} \times \frac{Estoque^{(3)}}{Throughput}$$

O progresso no estado de equilíbrio consiste em aumentar a eficiência final (relação 1) de duas maneiras “[...] by maintaining the stock with less throughput (increase ratio 3 or "maintenance efficiency") and by getting more service per unit of time from the same stock (increase ratio 2 or "service efficiency")” (DALY, 1974, p. 15).

A economia do estado estacionário (*steady-state*), nas palavras do autor, é uma economia como subsistema do planeta que cresce em suas dimensões físicas e que assimila para si uma proporção cada vez maior do total de matéria-energia do ecossistema, convertendo o espaço vital para a expansão da população em espaço econômico. Desta forma, em alguma escala o sistema deve se adaptar a este mesmo padrão de "Desenvolvimento sem crescimento", popularmente entendido como desenvolvimento sustentável (DALY, 1993, p. 813).

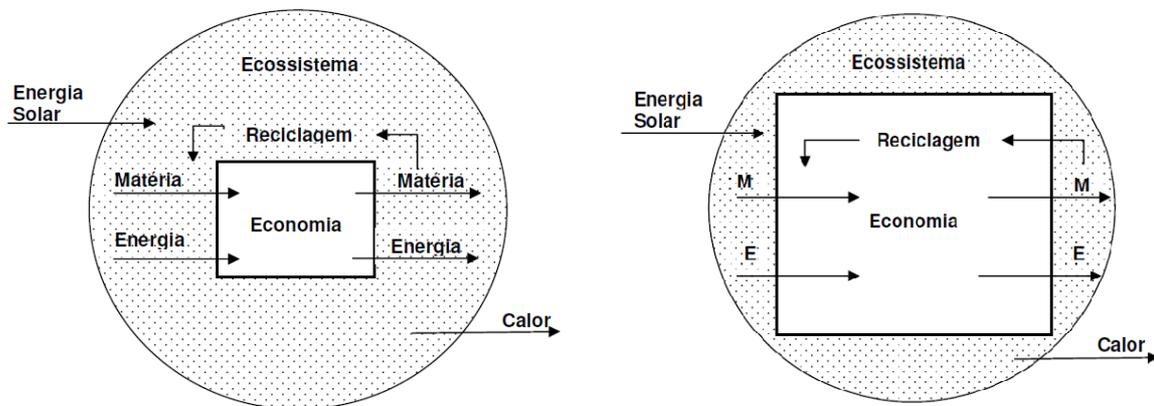


Figura 2 – Economia como subsistema, à esquerda “mundo vazio” e à direita “mundo cheio”  
 Fonte: DALY, 1993, p. 812, tradução nossa

Mesmo que a interpretação de Daly tenha sido criticada por Georgescu-Roegen, que passou a chamá-la de “mito da salvação ecológica” dada a falsa impressão de que o fim do crescimento resultaria numa vitória sobre a entropia, a idéia de se manter constantes estoques de capital manufaturado e o tamanho da população dá ênfase a um elemento ignorado pela análise econômica convencional que é questão da escala (VEIGA, 2009, p. 66).

Desta forma, os esforços teóricos de Daly permitiram que fosse inserido o conceito de “escala” aos mecanismos de alocação e distribuição universalmente aceitos pela economia tradicional, no que se refere ao volume físico de matéria e energia que é convertido e absorvido (*throughput*) nos processos entrópicos da expansão econômica. Portanto, para encontrar uma escala sustentável se fizeram necessárias adaptações gradativas a inovações tecnológicas, garantindo que a capacidade de suporte se mantivesse constante (MAY, 1996, p. 56).

Pela revisão exposta até aqui, percebe-se que a aplicação *stricto sensu* da Lei de Entropia pressupõe que não apenas toda forma de crescimento seja insustentável, mas toda forma de existência, porém, do ponto de vista físico nada é sustentável. É justamente por este motivo que sustentabilidade não pode ser apenas entendido do ponto de vista físico, inevitavelmente precisa incluir outras dimensões, o que exige um aprofundamento do processo de constituição deste conceito.

Para esse debate corroboramos com Freeman e Soete (1997, p. 414), ao reconhecer que alguma redução de recursos e algum dano ao meio ambiente são inevitáveis<sup>9</sup>. Para isso as tecnologias de produção e consumo devem ser capazes de satisfazer dois critérios: primeiro a produção de resíduos que causam danos ao meio ambiente precisa ser gradualmente eliminada com métodos que impeçam a criação de resíduos não-recicláveis<sup>10</sup>. Segundo o estoque total disponível de recursos não-renováveis não deve ser reduzido. Para tanto, é preciso que as tecnologias de produção utilizem recursos renováveis ou que substitutos sejam descobertos continuamente, repondo os recursos não renováveis à medida que eles vão sendo esgotados.

À guisa de conclusões, não resta dúvida que o modelo capitalista contemporâneo tem uma tendência insustentável o que não nos garante afirmar que toda forma de crescimento também seja. A afirmação requer um entendimento das reais condições para se alcançar um desenvolvimento sustentável, a ser elaborada na próxima seção.

### **1.1.2 A evolução do conceito de desenvolvimento sustentável**

Tendo em vista que os aportes teóricos apresentados no item anterior não tiveram repercussão imediata para os objetivos a que se propunham, o processo de emergência da noção de “desenvolvimento sustentável” teve um marco inicial na publicação, em 1972, do relatório contratado por um grupo de debatedores do Clube de Roma intitulado “Limites ao Crescimento”, em que cientistas do *Massachusetts Institute of Technology* comprovam, por meio de sofisticados modelos quantitativos, os limites do progresso econômico americano, devido à pressão sobre os recursos naturais e energéticos, mesmo considerando os avanços das tecnologias (MEADOWS, 1972 apud DALCOMUNI, 1997, p.18).

---

<sup>9</sup> A grande questão está em restringir essa redução e os danos de forma que os recursos possam ser repostos por reciclagem e que os danos possam ser contidos ou revertidos por meio de políticas compensatórias.

<sup>10</sup> Este é um objetivo mais ambicioso que o problema da redução da poluição, que levam a políticas que apenas controlam a emissão, levando-a de um local para outro, como por exemplo, a substituição das descargas em rios por depósitos em aterros sanitários (FREEMAN E SOETE, 1997, p. 413).

Esse relatório que cristalizou as principais idéias presentes no debate ambiental daquele momento, previa que o principal problema limitador do crescimento econômico mundial seria o esgotamento dos recursos não-renováveis, nomeadamente os combustíveis fósseis e os metais. Segundo o relatório, se os Estados Unidos mantivessem a mesma trajetória de crescimento econômico seguida nos cinquenta anos anteriores, a escassez de matérias-primas e a poluição promoveriam o colapso do sistema inteiro nos cinquenta anos seguintes (WARHURST, 1993; apud DALCOMUNI, 1997, p.18).

Outra importante contribuição deste relatório foi tornar evidente o descaso dos modelos econômicos com a questão ambiental, o que fez com que essa temática entrasse definitivamente na agenda de pesquisa dos economistas. A própria função de produção, tradicionalmente entendida como uma combinação matemática entre capital ( $K$ ) e trabalho ( $L$ ), ou seja,  $Y = f(L, K)$ , a partir de estudos do economista Robert Solow passou a incorporar a importante variável mudança tecnológica ( $A$ ), passando a ser formulada como  $Y = f(L, K, A)$ . Entretanto a contribuição da natureza permaneceu excluída desta função. Já na reformulação proposta por Binswanger, a partir do entendimento que a riqueza social é a soma do produto nacional e da qualidade do meio ambiente, a função passa a ser entendida a partir da combinação entre capital, trabalho, natureza e mudança técnica, sendo expressa como  $g(Y, E) = f(L, K, N, A)$ <sup>11</sup> (DALCOMUNI, 2005, p. 57).

Ainda no ano 1972, a grande repercussão da publicação deste relatório suscitou a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano. Também conhecida como Conferência de Estocolmo, destacou-se como o primeiro grande encontro internacional para a discussão dos problemas ambientais, com representantes de diversas nações, ampliando o debate da relação existente entre desenvolvimento e meio ambiente, precedendo uma série de eventos

---

<sup>11</sup> Duas questões sobre a utilização dos recursos que emergem a partir da formulação desta função e precisam de especial análise é a idéia de que o capital natural pode ser infinitamente substituído pelo capital material (feito pelo homem) e a noção de que o progresso tecnológico irá superar todos os limites que possam surgir ao crescimento devido a escassez dos recursos (MAY, 1996, p. 54).

que colocaram a sustentabilidade ambiental no centro dos debates das negociações globais.

Ainda que este tema já estivesse muito presente nos debates internacionais, até meados da década de 1980, não existia uma idéia consolidada do que seria um desenvolvimento sustentável. Sua legitimação e sistematização na forma de um conceito formal, ocorreu somente a partir da publicação do Relatório de Brundtland<sup>12</sup>, elaborado pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento<sup>13</sup>, e publicado sob o título “Nosso Futuro Comum”, no ano de 1987 (DALCOMUNI, 1997, p. 20). Segundo esse relatório o desenvolvimento sustentável é um conceito amplo para o progresso econômico e social, e definido como “*development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs*”<sup>14</sup> (WCED, 1987).

A publicação deste conceito de desenvolvimento sustentável suscitou muito mais críticas do que aceitações, pois transmitia uma idéia vaga e ambígua, e parecia incapaz de exercer influência necessária nos valores e ações da sociedade. Em linhas gerais exigia a incorporação da dimensão meio ambiente natural no desenvolvimento econômico, passando a formar três pilares básicos, quais sejam suas dimensões econômica, social e ambiental (DALCOMUNI, 2005, p. 52).

A continuidade deste debate ocorreu na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, convocada pela Assembléia Geral das Nações Unidas, no ano de 1990. Também conhecida como Cúpula da Terra, a Conferência do Rio ou simplesmente Rio-92 discutiu e propôs as políticas essenciais para alcançar um modelo básico de desenvolvimento sustentável que reconhecesse os limites do

---

<sup>12</sup> Este relatório apresentou a proposta de integrar a questão ambiental no desenvolvimento econômico. Dentre suas propostas destaca-se a que governos devem adotar uma estratégia no sentido de diminuir o consumo de energia e promover o desenvolvimento de tecnologias que admitem o uso de fontes energéticas renováveis.

<sup>13</sup> Criada pela Organização das Nações Unidas (ONU), tinha como objetivo reexaminar as questões críticas relativas ao meio ambiente e propor novas formas de cooperação internacional nesse campo.

<sup>14</sup> “[...] Desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (WCED, 1987, tradução nossa).

desenvolvimento econômico. Contudo, desde a Conferência de Estocolmo, foram inexpressivos os avanços na implementação dos compromissos assumidos, tendo em vista o pouco progresso que foi feito, em termos de uma definição rigorosa do conceito, e pelos insuficientes esforços no sentido de “operacionalizá-lo” com intuito de mostrar como pode ser integrado às práticas de tomadas de decisão<sup>15</sup>.

Essa foi uma das conclusões da nova cúpula mundial realizada pela Comissão de Desenvolvimento Sustentável da ONU em Joanesburgo, na África do Sul, em 2002, conhecida como Conferência Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável, ou Rio+10. Sob a temática “Desenvolvimento Sustentável”, foram avaliados os avanços e obstáculos dos compromissos assumidos em 1992, identificando os motivos pelos quais os avanços na implementação dos compromissos assumidos foram inexpressivos e propor medidas que pudessem viabilizar a sua realização.

Uma das dificuldades em operacionalizar esse conceito é resultado da utilização do termo “desenvolvimento” ao invés de “crescimento” econômico que implica na aceitação das limitações do uso de medidas como o Produto Nacional Bruto (PNB), para medir o bem-estar social das nações. Pois, o desenvolvimento envolve questões mais amplas como o aumento da renda real per capita; melhorias na saúde e estado nutricional; grau de escolaridade; acesso a recursos; aumento das liberdades fundamentais e uma “justa” distribuição de renda. Esse fato é percebido quando países com altas taxas de crescimento do PIB não são capazes de reduzir a pobreza e as desigualdades de renda e melhorar o acesso à saúde, à educação e à cultura.

No ano de 1990, dada dificuldade em avaliar os esforços locais de desenvolvimento utilizando-se o PIB *per capita*, a ONU sugeriu a criação do Índice de Desenvolvimento Humano – IDH que é resultado da média aritmética dos indicadores de saúde e educação, complementados pelo próprio PIB *per capita*. Apesar do avanço na forma de

---

<sup>15</sup> A proposta de Pearce, Barbier e Markandya (1994, p. 1-2) ainda que reconheça uma limitação em transmitir uma noção concisa do conceito, estabelece como condição mínima para que se alcance o desenvolvimento sustentável, a não diminuição do capital natural ao longo do tempo, entendendo este capital natural como o estoque de todos os recursos naturais e ambientais, do petróleo no subterrâneo e dos estoques de peixe nos oceanos até a capacidade do planeta em reciclar o carbono.

mensuração do desenvolvimento, o índice ainda guarda problemas, pois se a análise for feita apenas do ponto de vista do IDH, a precariedade dos indicadores de saúde e de educação pode ser compensada pelo PIB *per capita*<sup>16</sup>. Ainda que este indicador tenha surgido após a consolidação da noção de desenvolvimento sustentável, desenvolvidas no Relatório de Brundtland, não considerou a problemática ambiental o que o fez nascer obsoleto.

Mesmo que sejam remotas as chances de surgir um único indicador que releve simultaneamente o grau de sustentabilidade do processo econômico e social e o grau de qualidade de vida que dele ocorre, após duas décadas da publicação do Relatório de Brundtland era de se esperar que já tivesse emergido ao menos um mecanismo de mensuração da sustentabilidade, que fosse mundialmente legitimado e capaz de garantir um grau de monitoramento mínimo<sup>17</sup>. Essa tarefa tem se mostrado muito mais complexa do que poderiam ter imaginado os pioneiros da concepção do conceito, dada a complexidade inerente à integração de fatores biofísicos, psicológicos, econômicos e socioculturais.

A preocupação sobre a utilização do PIB como indicador de desempenho econômico e progresso social, é tão antiga quanto o próprio sistema de contas nacionais e os alertas sobre os seus riscos foram feitos justamente por um dos seus principais criadores Simon Kuznets (1901-1981). Porquanto, o PIB é uma adição de bens e serviços vendidos e comprados sem preocupação com os benefícios para a sociedade. Seus defensores argumentam que o referido índice não foi criado para medir o progresso social, bem estar ou qualidade de vida, e sim o crescimento econômico, que é um meio sem qual não se atinge os fins. Tanta ênfase numa concepção que logo se tornou

---

<sup>16</sup> Um exemplo desta distorção é dado pelos Emirados Árabes Unidos (EAU) e o Chile, classificados respectivamente em 39º e 40º lugares na lista dos países de maior desenvolvimento do último Relatório do PNUD. Embora esses países empatassem na esperança de vida ao nascer com 78,3 anos de vida, o Chile estava muito mais avanço em termo educacionais com 83% de escolarização contra 60% dos EAU, mesmo assim seu IDH de 0,868 era ligeiramente maior que o Chile com 0,867 por terem mais que o dobro do PIB per capita Chileno, US\$ 25.514 contra US\$ 12.027 (VEIGA, 2009, p. 100).

<sup>17</sup> Embora a presente Dissertação não almeje revisar todas as iniciativas subjacentes podemos destacar o Índice de Bem-Estar Econômico Sustentável proposto por Herman Daly e John Cobb, na obra *For the Common Good*, de 1989, e o *Ecological Footprint* (pegada ecológica), desenvolvido por William Rees e Mathis Wackernagel, na obra *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*, de 1995.

antiquada, por enfatizar a produção de mercadorias e capital físico, fez emergir propostas alternativas com o objetivo impedir que a riqueza seja mensurada por uma simples soma de produtos mercantis<sup>18</sup>.

O contexto de insatisfação sobre o atual estado das informações estatísticas, que dizem respeito à sociedade, fez com que o Governo Francês idealizasse no início de 2008, a *Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress – CMEPSP*, com objetivo principal de identificar os limites da utilização do PIB como indicador do desempenho econômico e progresso social, conforme segue.

The Commission's aim has been to identify the limits of GDP as an indicator of economic performance and social progress, including the problems with its measurement; to consider what additional information might be required for the production of more relevant indicators of social progress; to assess the feasibility of alternative measurement tools, and to discuss how to present the statistical information in an appropriate way (CMEPSP, 2009, p. 7).

Para tal empreitada, o Governo Frances convocou dois detentores de prêmios Nobel de economia Joseph Stiglitz e Amartya Sen, sob coordenação de Jean-Paul Fitoussi, o que tornou a iniciativa mundialmente conhecida como “Comissão Stiglitz-Sen-Fitoussi”, contando ainda com vinte dois especialistas com ampla diversidade de visões em variados temas que vão da contabilidade nacional à economia das mudanças climáticas<sup>19</sup>.

A contribuição dos trabalhos da Comissão Stiglitz-Sen-Fitoussi está na sua interpretação como o debate mais atual e especializado sobre os desafios ao

---

<sup>18</sup> Principalmente a operacionalização do conceito de Genuine Savings (Poupança Genuína) do Banco Mundial, disponível em <<http://www.worldbank.org/>> e o Indicador de Progresso Genuíno da ONG Redefining Progress disponível em <<http://www.rprogress.org/>>.

<sup>19</sup> A Comissão ainda era composta pelos especialistas: Bina AGARWAL, University of Delhi; Kenneth J. ARROW Stanford University; Anthony B. ATKINSON, Warden of Nuffield College; François BOURGUIGNON, School of Economics; Jean-Philippe COTIS, Insee; Angus S. DEATON, Princeton University; Kemal DERVIS, UNPD; Marc FLEURBAEY, Université Paris 5; Nancy FOLBRE, University of Massachussets; Jean GADREY, Université Lille; Enrico, GIOVANNINI OECD; Roger GUESNERIE, Collège de France; James J. HECKMAN, Chicago University; Geoffrey HEAL, Columbia University; Claude HENRY, Sciences-Po/Columbia University, Daniel KAHNEMAN, Princeton University; Alan B. KRUEGER, Princeton University; Andrew J. OSWALD, University of Warwick; Robert D. PUTNAM, Harvard University; Nick STERN, London School of Economics; Cass SUNSTEIN, University of Chicago; Philippe WEIL Sciences Po.

desenvolvimento sustentável. Tendo como perspectiva a distinção entre a avaliação do “bem estar atual”, relacionado à como a sociedade se sente no ambiente em que vive e a “sustentabilidade ambiental” considerando as condições que são repassadas às gerações futuras, a Comissão passou a se organizar em três grupos de trabalho intitulados: *Classical GDP Issues*, *Quality of Life* e *Sustainable Development and Environment*, que tiveram como produto final do seu trabalho a indicação de “mensagens” e “recomendações”.

The report distinguishes between an assessment of current well-being and an assessment of sustainability, whether this can last over time. Current well-being has to do with both economic resources, such as income, and with non-economic aspects of peoples' life (what they do and what they can do, how they feel, and the natural environment they live in). Whether these levels of well-being can be sustained over time depends on whether stocks of capital that matter for our lives (natural, physical, human, social) are passed on to future generations (CMEPSP, 2009, p. 11).

Sua contribuição específica para a constituição de indicadores de desenvolvimento sustentável é sintetizada em mensagens que sugerem a idéia que medir sustentabilidade difere da prática estatística *standard* em uma questão fundamental. Para que seja adequada, são necessárias projeções e não apenas observações, além de exigir algumas respostas prévias a questões normativas. Também nesse aspecto há forte diferença com a atividade estatística *standard* ao envolver a dificuldade do contexto internacional, pois não se trata apenas de avaliar sustentabilidades de cada país em separado. Como o problema é global, sobretudo em sua dimensão ambiental, o que realmente interessa é a contribuição que cada país pode dar para insustentabilidade (CMEPSP, 2009, p. 11 a 18).

As recomendações foram elaboradas a partir da organização por grupos de trabalho. O Grupo *Classical GDP Issues* surge com o objetivo de contrapor os problemas da utilização do PIB, e, considerar a renda e o consumo em conjunção com a riqueza, ao invés de olhar apenas a produção, que para sua operacionalização exige a criação de novas formas de mensurar a renda em atividades não-mercantis. Esse esforço tem

como objetivo enfatizar a perspectiva domiciliar, dando mais proeminência à distribuição da renda, do consumo e da riqueza<sup>20</sup>.

As recomendações do Grupo *Quality of Life* indicam que as instituições de estatística precisam incluir medidas subjetivas de bem-estar que possam informar o que as pessoas fazem da vida, suas experiências hedônicas e prioridades. Para tanto, precisam se munir de informações de diversas dimensões da qualidade de vida que possam ser ligadas e agregadas, permitindo a construção de diferentes índices compostos ou sintéticos. As mencionadas ações objetivam reduzir as desigualdades em oito dimensões críticas, a saber: saúde, educação, atividades pessoais, voz política, conexões sociais, condições ambientais e insegurança pessoal e econômica.

Para o grupo de trabalho *Sustainable Development and Environment*, a avaliação da sustentabilidade do desenvolvimento requer um conjunto sintético e bem selecionado de indicadores que sejam capazes de avaliar tanto a qualidade de vida quanto o desempenho econômico, que interpretem a sustentabilidade como variações de estoque não de fluxos. Quanto à sustentabilidade nos aspectos ambientais, se faz necessário um acompanhamento específico a partir de indicadores físicos, que possa sinalizar a aproximação a níveis perigosos de danos ambientais como no caso das mudanças climáticas. Mesmo que consideremos a importância dos índices monetários de sustentabilidade, é preciso que eles estejam focados nas dimensões estritamente econômicas da sustentabilidade.

A contribuição de toda a análise elaborada até aqui, especialmente os aportes da CMEPSP para o trabalho como um todo, caminha no sentido de admitir que apenas substituir a forma do recurso energético usado no desenvolvimento, não é a solução para se alcançar um modelo de desenvolvimento ambientalmente sustentável. Antes de

---

<sup>20</sup> Entre o momento em que o relatório foi elaborado e sua conclusão a ocorrência da crise financeira mundial garantiu ainda mais elementos de discussão, tendo em vista que para evitar a ocorrência desse evento os sistemas de contabilidade pública e o setor privado não foram capazes de emitir um alerta, o que reafirmaria a urgência de reformas. Outra crise iminente é a ambiental, especialmente associada ao aquecimento global, haja vista a distorção dos preços de mercado resultantes da ausência de taxas sobre as emissões de carbono (CMEPSP, 2009, p. 9).

indicadores operacionais mais precisos para monitorar o progresso social, é preciso definir quais são as condições mínimas de qualidade de vida requerida para o bem estar da sociedade que não se resuma na quantificação de sua capacidade de consumir bens e serviços<sup>21</sup>.

O desejo de um desenvolvimento sustentado envolve agentes sociais e suas transformações culturais ao longo do tempo. A aceitabilidade de um paradigma alternativo, que combine crescimento sustentado e desenvolvimento sustentável implica a aceitação de um novo estilo de vida por parte da sociedade. Para a próxima seção surge o desafio de analisar como o consumo de energia pode proporcionar essas condições mínimas de desenvolvimento da sociedade e como esse pode repercutir na garantia da sustentabilidade ambiental.

## **1.2 Desenvolvimento econômico e emissões de carbono**

A energia é um bem básico para a garantia do desenvolvimento ao ser humano, por proporcionar ampla gama de oportunidades e os meios para que indivíduos e comunidades impulsionem o crescimento econômico, a melhoria da qualidade vida e o bem estar da sociedade. A energia é também um dos elementos fundamentais da infraestrutura necessária para o desenvolvimento econômico e o seu consumo mantém forte relação com os impactos ao meio ambiente. Se no passado a energia era tratada como mero insumo do processo produtivo, nos dias atuais desempenha papel de destaque nas estratégias empresariais e nas políticas governamentais.

Se por um lado o crescimento econômico pressupõe um aumento do consumo de energia em escala, por outro o desenvolvimento econômico exige uma análise qualitativa da questão energética, como o modo de vida e padrão de consumo da sociedade. Em outras palavras, a determinação das políticas energéticas, tecnológicas e ambientais traduzirá o modelo de desenvolvimento econômico e se analisarmos de

---

<sup>21</sup>Ainda que a próxima seção proporcione alguma forma de debate sobre as condições mínimas requeridas para o desenvolvimento, reconhecemos que a complexidade deste tema requer um aprofundamento que foge da proposta de análise prevista para esta dissertação, restando a sua indicação para trabalhos posteriores.

formas diferentes crescimento e desenvolvimento, é possível acreditar que existem caminhos alternativos aos percorridos pelos países desenvolvidos, que tenham menos “intensidade energética” (COHEN, 2003, p. 245-246).

Ainda que essas questões determinem os objetivos da política energética, as transformações de energia devem também considerar o desafio de fornecer serviços que sejam capazes de melhorar a qualidade de vida da sociedade por meio da saúde, educação, esperança de vida e conforto, tendo em vista que uma fonte de energia segura, justa e sustentável é fundamental para o desenvolvimento econômico. As políticas energéticas podem trazer uma variedade de benefícios sociais, por meio da utilização de novas tecnologias para produção de energia, que sejam capazes de universalizar o acesso a energia adequada com serviços modernos, determinando o quantitativo de pessoas que podem potencialmente atingir um padrão mínimo de qualidade de vida no futuro.

Dado o quantitativo de pessoas que podem potencialmente atingir este padrão mínimo de qualidade de vida a partir o consumo de energia, a questão demográfica acaba afetando diretamente o tamanho da demanda. Assim, o consumo de energia compõe o estilo de vida da sociedade moderna, que inclui atividades cada vez mais dependentes desse insumo, para satisfazer suas necessidades de transporte, lazer e conforto material<sup>22</sup>.

Segundo dados do *World Energy Outlook*, todo o aumento da população mundial irá ocorrer em áreas urbanas e pela primeira vez na história, no ano 2009, a população urbana mundial ultrapassou a rural. A contínua e rápida urbanização dos países não

---

<sup>22</sup> Com base nas projeções recentes do PNUMA, a população mundial tenderá a crescer em média 1% ao ano, passando de 6,6 em 2007 para 8,2 bilhões de habitantes em 2030. A maior parte deste crescimento populacional tende a acontecer além das fronteiras dos países desenvolvidos, especialmente nos continentes Asiático e Africano. Essa população crescerá 1,1% por ano entre 2007 e 2030, atingindo 6,9 bilhões de habitantes, o que corresponderá a 84% do total mundial. Observa-se ainda que para o continente Africano seja projetada a maior taxa de crescimento, embora o maior aumento, em termos absolutos, ocorrerá em países da Ásia (IEA, 2009, p. 57).

pertencentes a OCDE tenderá a aumentar em grande escala a demanda por energia, que em sua maior parte é consumida dentro ou perto de cidades<sup>23</sup>.

Esse contexto nos coloca diante de um impasse, se por um lado a necessidade de garantir padrões mínimos de desenvolvimento exige um maior consumo de energia, por outro não restam dúvidas de que esse processo não é possível sem crescimento econômico. Na próxima seção, com vista a elucidar esse dilema, será abordada a relação existente entre crescimento econômico e consumo energético, traduzida principalmente pela mensuração da intensidade energética do crescimento econômico.

### **1.2.1 A intensidade energética do crescimento econômico**

A existência de uma forte relação entre crescimento econômico e consumo de energia é um consenso que gera pouca controvérsia, ainda que não seja tão trivial a quantificação desta relação. A resposta para essa questão descortina uma ampla gama de possibilidades de pesquisa, que vem evoluindo ao longo do tempo, essencialmente no entendimento da influência do contexto energético no desenvolvimento econômico.

Os modelos econométricos que tratam desta relação<sup>24</sup>, até início dos anos 1960, concluíam que havia um único padrão na relação entre aumento do consumo de energia e o crescimento econômico, expresso em uma elasticidade-renda próxima a um. Esse modelo faz com que todos os países, independentes do seu estágio de desenvolvimento, sigam uma única trajetória com crescentes níveis de renda e consumo energético (PINTO JUNIOR, 2007, p. 25-30).

Nos desenvolvimentos posteriores de J. Darmstadter (1971, apud PINTO JUNIOR, 2007, p. 30) constatou-se que embora a relação energia e PIB fosse estreita, ela não

---

<sup>23</sup> Nestes ambientes, o processo de envelhecimento da população, sinalizado pelas quedas contínuas das taxas de fertilidade e mortalidade é outro impulso ao consumo de energia nos próximos anos, pois afetam o nível e o padrão do consumo. Um exemplo desta modificação é o crescimento da demanda por sistemas de aquecimento e refrigeração nos espaços residenciais, haja vista que a faixa da população idosa tende a viajar menos para o trabalho e o lazer (IEA, 2009, p. 58).

<sup>24</sup> Destacam-se os trabalhos de E. Mason (1955) e Mainguy (1967).

era próxima de um, havendo dispersões significativas que não poderiam ser ignoradas entre diferentes grupos e países, segundo diversos estágios de desenvolvimento. Suas pesquisas concluíram que a renda *per capita* era uma variável explicativa para o consumo *per capita* de energia, mas não a única. Seu modelo chegou a seguinte formulação:

$$\text{Log} (E/P) = \alpha + \beta Y/P^{25}$$

A agenda de pesquisa dos modelos econométricos, aplicados ao setor energético dos anos 1970, recebeu importantes contribuições de Janosi e Grayson (1971, apud PINTO JUNIOR, 2007, p. 30). Com o estabelecimento de relações entre crescimento do PIB e o consumo de energia para trinta países entre 1953 e 1965, o modelo foi expresso pela seguinte equação:

$$\text{Log}E = \alpha + \beta \text{PIB}$$

A partir destes trabalhos foi confirmada a forte relação existente entre o crescimento econômico e o consumo de energia, embora os coeficientes de elasticidade em relação ao PIB variassem entre os países. No que diz respeito às estruturas econômicas, a elasticidade do consumo de energia em relação ao PIB parecia ser tanto mais elevada quanto maior fosse o crescimento da indústria em uma economia predominantemente agrícola. A tendência se invertia à medida que a participação da indústria aumentava no PIB (PINTO JUNIOR, 2007, p. 31).

Essa intensidade é uma das principais formas de quantificação da relação existente entre consumo de energia e crescimento, pois representa uma medida de eficiência energética de uma nação calculando unidades de energia primária por unidade do PIB. De maneira geral, a intensidade energética tende ao declínio na maioria dos países num espaço de tempo considerável, embora exista uma limitação tecnológica para

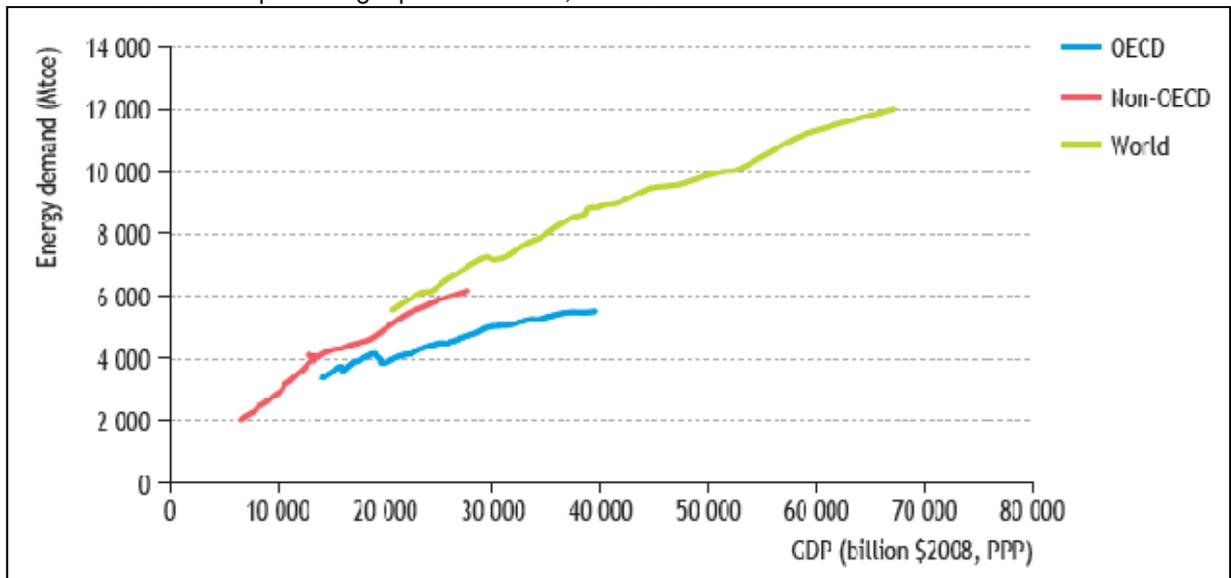
---

<sup>25</sup> Em que “E/P” representa o consumo de energia *per capita* (“E” é a energia, contabilizada em toneladas equivalentes de carvão, “P” representa a população, em número de habitantes, e “Y/P” a renda *per capita*).

redução da intensidade energética. Alguns problemas são encontrados neste indicador. Um deles é não apresentar qual a fonte energética empregada, de forma que uma matriz energética eficiente do ponto de vista do consumo de energia pode não ser ambientalmente eficiente em termos econômicos. Outro problema é utilização de dados nacionais enquanto muitos países utilizam recursos e serviços ambientais oriundos de fora de suas fronteiras através do comércio internacional e da poluição fazendo deste problema um desafio de ordem global (COHEN, 2002, p. 131-132).

Essa relação é constatada no *World Energy Outlook*, do ano de 2009, haja vista que o PIB é o principal motor da demanda por serviços energéticos. De maneira geral, a demanda por energia primária aumentou linearmente com o PIB, conforme Gráfico 1. Entre 1971 e 2007, cada 1% de aumento na produção interna bruta, correspondeu a um acréscimo de 0,7% do consumo de energia primária (IEA, 2009, p. 59).

Gráfico 1 – Demanda por energia primária e PIB, 1971-2007



Fonte: IEA, 2009, p. 59.

O histórico da elasticidade-renda da demanda por energia primária, que representa um aumento proporcional da demanda em relação ao produto bruto, sofreu uma queda acentuada de 0,8 em 1970 para 0,5 em 1990, e em seguida subiu para 0,7 no período 2000-2007. Uma das explicações principais é o aumento da intensidade energética chinesa (IEA, 2009, p. 59).

Ainda que este indicador apresente uma tendência de queda, sua avaliação precisa considerar o consumo total de energia, como concluiu o estudo de Markandya, Pedroso-Galinato e Streimikiene (2006) que ao investigar a intensidade energética de doze nações do Leste Europeu no período entre 2000 e 2020, percebeu que eles convergem para os níveis da União Européia. Por outro lado, a demanda real de energia durante o mesmo período é crescente, apesar da redução da intensidade energética. Portanto, os autores concluem não ser possível alcançar uma sustentabilidade das emissões com os níveis totais de consumo de energia.

Esse cenário de aumento do consumo de energia em escala, resultando em uma pressão cada vez maior sobre recursos naturais como resultado do crescimento do PIB é contrastado como o ressurgimento de teses que advogam a favor do decrescimento (*Décroissance*, em francês)<sup>26</sup>, tendo como ponto de partida interpretações próprias dos conceitos de “crescimento zero” e “*steady state*” expostos na primeira seção deste capítulo.

Dentre as diversas formas de abordagens do assunto, Hueting (2010) entende que para se alcançar níveis plausíveis de sustentabilidade ambiental é preciso uma ampla aceitação da diminuição do nível de produção, já que nosso planeta está ameaçado por uma crença errada de um crescimento mal formulado. As propostas de Schneider, Kallis e Martinez-Alier (2010) esclarecem que o crescimento econômico não é sustentável e que o progresso humano sem crescimento econômico é possível, para tanto definem o decrescimento sustentável como:

“an equitable downscaling of production and consumption that increases human well-being and enhances ecological conditions at the local and global level, in the short and long term” (SCHNEIDER; KALLIS; MARTINEZ-ALIER, 2010)

Os autores em questão defendem ainda uma transição harmoniosa, equitativa e voluntária para um regime de baixa produção e consumo. Seguindo esta interpretação,

---

<sup>26</sup> Nas palavras de um dos mais notórios defensores, o economista e filósofo francês Serge Latouche (1940-), a coleção mais rica e completa do assunto é resultado da Conferência Internacional sobre a temática realizada em Paris no mês abril de 2008 e reproduzida na edição 18 do *Journal of Cleaner Production* (2010).

as chances de se alcançar a sustentabilidade ecológica são maiores se forem operadas por decisão coletiva e democrática do que pela imposição de uma crise econômica.

No entanto, o maior obstáculo está nos países que já alcançaram altos graus de desenvolvimento admitir que já possam dispensar o crescimento econômico. Ainda que não existam elementos suficientes para afirmar que esta consciência tenha sido despertada, duas publicações podem ser identificadas como uma sinalização da existência deste movimento que são: o relatório *Prosperity without Growth?*, da Comissão de Desenvolvimento Sustentável do Governo Britânico; e o segundo livro do Professor Peter Victor, da Universidade de York no Canadá, intitulado *Managing Without Growth: Slower by Design, Not Disaster*<sup>27</sup>.

A grande dificuldade interpretada em conciliar as teses a favor do decrescimento parte do pressuposto de que o atual modelo de crescimento econômico capitalista ao ser profundamente desigual e excludente, principalmente na garantia de um bem básico como a energia, só será capaz de superar este quadro com promoção do crescimento. Desta maneira, mesmo que nem todo crescimento se traduza em desenvolvimento, todo desenvolvimento requer crescimento.

Na tentativa de proporcionar um tratamento adequado para essas noções, Sachs (2000) analisa diversas formas de crescimento e impactos sobre os sistemas econômicos, sociais e ambientais, sugerindo a esquematização esboçada no quadro que segue:

Quadro 1 – Formas de crescimento e impactos

	<b>Impactos econômicos</b>	<b>Impactos Sociais</b>	<b>Impactos Ambientais</b>
Crescimento desordenado	Sim	Não	Não
Crescimento social benigno	Sim	Sim	Não
Crescimento ambientalmente sustentável	Sim	Não	Sim
Desenvolvimento	Sim	Sim	Sim

**Fonte:** Sachs (2000, p. 36).

<sup>27</sup> O relatório da Comissão de Desenvolvimento do Sustentável Governo Britânico está disponível em <<http://www.sd-commission.org.uk/pages/redefining-prosperity.html>> e um resumo do livro de Peter Victor está disponível em <[http://www.pvictor.com/MWG/About\\_the\\_Book.html](http://www.pvictor.com/MWG/About_the_Book.html)>

Entendemos que as idéias de “desenvolvimento sem crescimento” apresentam dois equívocos: o primeiro é confundir “crescimento econômico” com “crescimento do consumo material”, e o segundo é ignorar o fato de que não há desenvolvimento sem crescimento. Se o desenvolvimento pode, em tese, ser sustentável, isso pressupõe acreditar que o crescimento, nele embutido, é também necessariamente sustentável.

Obviamente, se negligenciarmos a constatação apresentada, pode-se afirmar que crescimento e desenvolvimento sejam a mesma coisa. E o próprio crescimento por ele mesmo não é suficiente, pois o crescimento que constitui a base do desenvolvimento sustentável precisa ser socialmente regulado, com base em critérios de equidade e justiça social.

Diante dos fatos expostos, mesmo que o crescimento econômico seja o principal motor do aumento da demanda por serviços energéticos, o problema ambiental da sustentabilidade do desenvolvimento no que se refere à energia pode não ser apenas o crescimento econômico, e a possibilidade da origem deste problema residir na estrutura da demanda será analisada a seguir.

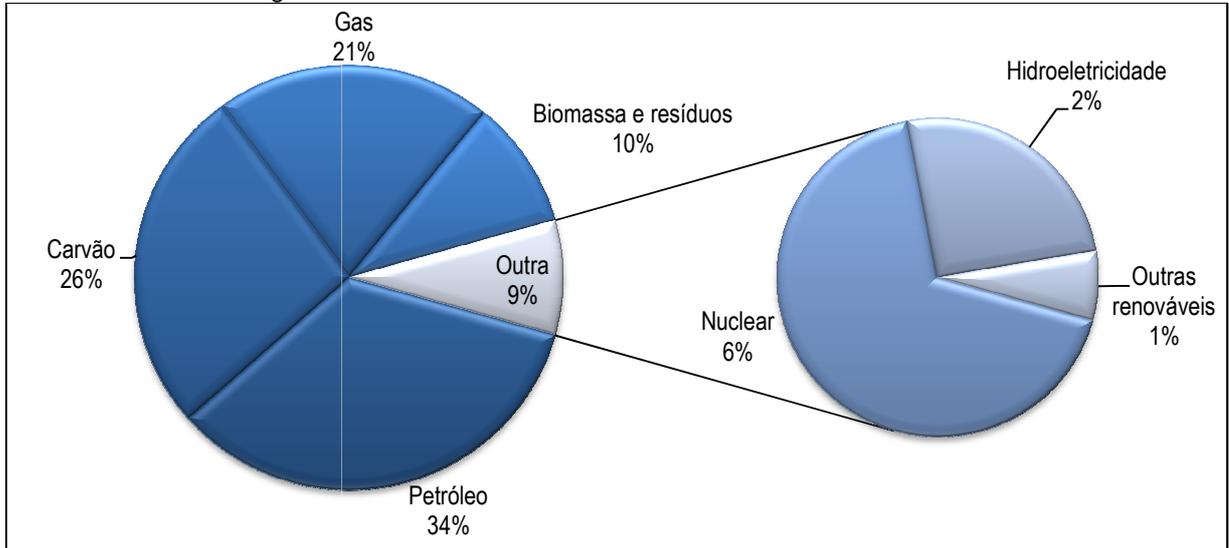
### **1.2.2 A estrutura da demanda mundial de energia**

A estrutura da matriz energética mundial guarda estreita relação com o problema global das mudanças climáticas, pois é em grande parte responsável pela escalada de emissões de poluentes na atmosfera. Na atualidade, fontes com grande potencial de emissões como o petróleo, o carvão e o gás representam 81% do consumo mundial de energia.

Os dados do *World Energy Outlook*, no ano de 2009, projetam um aumento de 1,5% da demanda global por energia primária por ano entre 2007 e 2030. Neste período, os combustíveis fósseis continuariam a ser as principais fontes primárias de energia, correspondendo a 77% do aumento global de demanda de energia, sendo que, em termos de volume, o maior aumento de demanda será pelo carvão, seguido pelo gás e petróleo. Para as energias renováveis observa-se uma taxa mais rápida de aumento da

demanda, embora sua participação prevista no total seja de apenas de 2% (IEA, 2009, p. 74)<sup>28</sup>.

Gráfico 2 – Matriz Energética Mundial em 2007



Fonte: IEA, 2009, p. 74.

No cenário proposto, pouco mais de 90% da demanda mundial de energia primária virá de regiões fora da OCDE, como Europa Oriental, Oriente Médio, África, América Latina e Ásia (especialmente China e Índia), fazendo com que suas participações na demanda mundial cresçam entre 52% e 63%, até 2030. Desde 2005, as nações que compõem essas regiões ultrapassaram os países da OCDE, como os maiores consumidores de energia. O aumento da demanda é justificado pela intensificação do processo de crescimento econômico, através do rápido processo de industrialização e urbanização. No contexto dos países, o principal impulso é dado por Índia e China que representam, respectivamente, 15% e 39% do aumento global de consumo de energia. A maior parte

<sup>28</sup> Importante ressaltar que, por questões metodológicas, os cenários propostos pelo estudo em questão, prospectam um futuro no qual os governos não assumam mudanças nas políticas energéticas e não tomam medidas que afetam o setor de energia. Ou seja, as projeções revelam uma previsão do que pode ocorrer se nada for feito, não que isso seja esperado. Segundo o próprio relatório, está cada vez mais provável que os governos ao redor do mundo tomem medidas efetivas para enfrentar os desafios energéticos, como alterações climáticas, segurança energética e escassez de energia (IEA, 2009, p. 75).

deste aumento está no consumo de carvão, que continua a ser o principal combustível para geração de energia (IEA, 2009, p. 76)<sup>29</sup>.

A principal consequência da estrutura descrita são as mudanças climáticas globais, aqui definidas como o resultado de um processo de acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera e apresenta-se como um dos maiores desafios da sociedade nos dias atuais. As interferências humanas como o consumo de energia, contribuem para a mudança do clima, com o aumento da concentração na atmosfera de gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o metano (CH<sub>4</sub>), conhecidos como gases de efeito estufa – GEE. A consequência é o impedimento da liberação para o espaço do calor emitido pela superfície terrestre, aumentando a temperatura do planeta.

As elevações de temperatura podem ser resultado de uma variabilidade natural do clima ou de ações antrópicas. Apesar das incertezas quanto à sua magnitude, esse fenômeno é reconhecido por uma parcela cada vez maior da comunidade científica, destacando-se os esforços empreendidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC<sup>30</sup>, que definiu o processo de mudanças climáticas da seguinte forma: “[...] *change in the state of the climate that can be identified (e.g. using statistical tests) by changes in the mean and/or the variability of its properties, and that persists for an extended period, typically decades or longer*” (IPCC, 2007, p. 30).

Ao contrário do senso comum, o efeito estufa não se resume no simples aumento da temperatura. O processo é dotado de múltiplas facetas, e pode até resultar em baixas temperaturas em determinadas regiões<sup>31</sup>. Em outras palavras, o efeito estufa é a

---

<sup>29</sup> Ainda que grande parte da demanda de energia ocorra em países como Índia e China, uma análise do consumo per capita nos mostra que nestes países, os índices de consumo continuam muito inferiores aos observados nos países desenvolvidos. As diferenças regionais são significativas e no ano de 2030, a previsão é que ela atinja apenas 1,5 tep, nas regiões fora da OCDE, em comparação aos 4,4 tep alcançados pelos países da OCDE (IEA, 2009, p. 76).

<sup>30</sup> Estabelecido em conjunto pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), maior autoridade global em meio ambiente. O IPCC objetiva subsidiar as decisões políticas com uma fonte objetiva sobre as mudanças do clima e suas repercussões ambientais e sócioeconômicas, incluindo custos e benefícios da ação versus a inação e possíveis opções de resposta (IPCC, 2007).

<sup>31</sup> Como por exemplo, uma mudança na corrente do Golfo que pode congelar a Europa Ocidental (KEMP, 1996, p. 152).

mudança sobre clima e o aumento da temperatura global é um índice de mudança climática. Para exemplificar, as diversas formas de impactos decorrentes dos eventos extremos de mudança no clima e nível, analisa-se o Quadro 2:

Quadro 2 – Impactos decorrentes dos eventos extremos do tempo, clima e nível do oceano

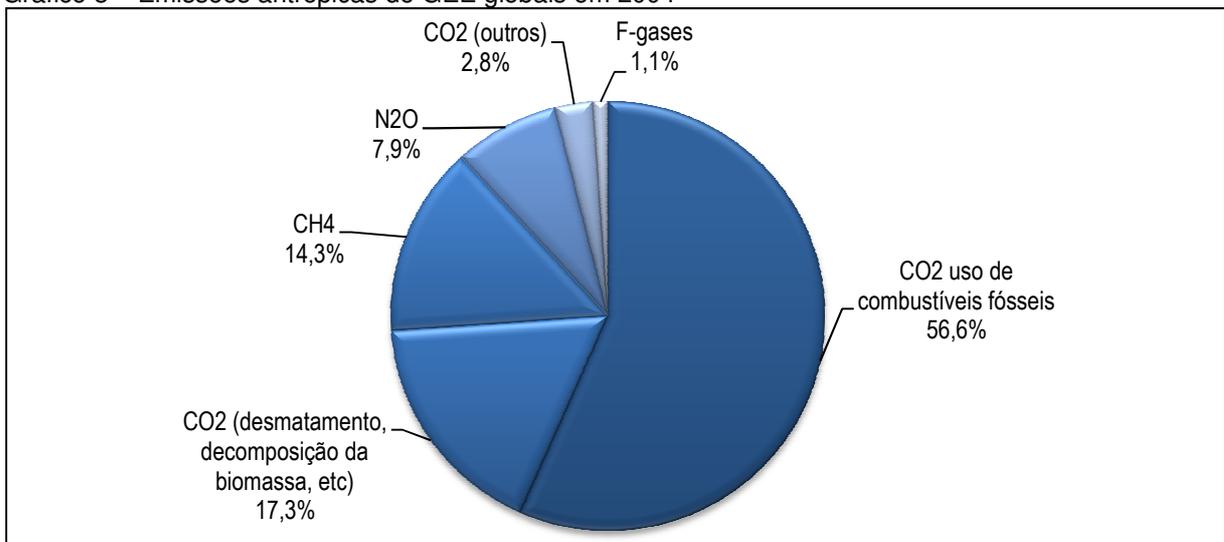
Fenômeno e direção da tendência	Probabilidade da tendência futura*
Dias mais quentes e noites menos frias;	Praticamente certo
Surtos de calor/ondas de calor: frequência aumenta sobre a maioria das áreas	Muito provável
Ocorrência de alta precipitação: a frequência aumenta sobre a maioria das áreas	Muito provável
Aumento das áreas afetadas pela seca	Provável
Aumento da atividade de ciclones tropicais intensos	Provável
Aumento da incidência de níveis do mar muito altos (exceto tsunamis)	Provável

\*Com base em projeções para o século 21, usando-se os cenários SRES.

Fonte: IPCC, 2007, p. 53, tradução nossa.

Em curso desde a Revolução Industrial, a forma predominante de aumento do efeito estufa, é dada pela queima de combustíveis fósseis, que aumentaram aproximadamente 100 ppm o grau de concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera em comparação aos níveis pré-industriais, atingindo 379 ppm no ano de 2005 (IPCC, 2007, p. 102).

Gráfico 3 – Emissões antrópicas de GEE globais em 2004



Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC, 2007, p. 103.

Corroborando com os dados apresentados, o *Fourth Assessment Report* do IPCC de 2007, afirma que entre os anos de 1900 a 2000, o consumo mundial de energia primária aumentou mais de dez vezes, enquanto a população mundial quadruplicou de 1,6 para 6,1 bilhões de pessoas. Previsões anunciam um crescimento considerável na demanda nas próximas décadas devido ao aumento das taxas de crescimento econômico em todo o mundo, mais especificamente nos países em desenvolvimento.

Se analisarmos setorialmente com a desagregação proposta pelo IPCC, concluiremos que no ano de 2004, 26% das emissões de GEE foram derivados do fornecimento de energia (eletricidade e aquecimento), 19% da indústria, 14% da agricultura, 17% de mudanças do uso da terra (desmatamento), 13% dos transportes, 8% do uso residencial, comercial e setores de serviços, 3% a partir de resíduos (IPCC, 2007, p. 104)<sup>32</sup>. Mesmo que todas as formas de atividade humana contribuam para emissão de determinada quantidade de GEE para a atmosfera, concluímos que o consumo de energia é um fator-chave, tornando indispensável a avaliação das possibilidades de mitigação de abatimento.

### **1.2.3 O potencial de mitigação e abatimento de carbono**

As repercussões nas alterações climáticas representam um desafio global de longo prazo, por envolverem questões intergeracionais, e fazem das respostas da humanidade a este desafio um teste à sua capacidade de gerir as consequências de suas próprias ações. Existem diversas opções de políticas de intervenção adotadas para lidar com o efeito estufa, podendo ser classificadas em três formas (KEMP 1996, p. 153):

---

<sup>32</sup> As tendências globais de emissão de CO<sub>2</sub> do *World Energy Outlook* mostram um rápido crescimento das emissões relacionadas ao consumo de energia, tendo em vista a demanda mundial por combustíveis fósseis. O aumento das emissões foi de 20,9 Gt em 1990 para 28,8 Gt em 2007, sendo projetado para atingir 34,5 Gt em 2020 e 40,2 Gt em 2030, com uma média de crescimento de 1,5% ao ano. Grande parte do crescimento das emissões tem origem nos países não membros da OCDE, enquanto que para os países membros é previsto um cenário melhor, haja vista melhorias na eficiência energética e o aumento do uso da energia nuclear e das renováveis, no contexto das políticas já adotadas para atenuar as mudanças no clima e aumentar a segurança energética (IEA, 2009, p. 111).

- a) Opções que podem eliminar ou reduzir as emissões de gases de efeito estufa;
- b) Opções em que as emissões são compensadas pela remoção de gases de efeito estufa da atmosfera, bloqueando a radiação solar incidente, ou alterando a reflexão ou propriedades de absorção da superfície da terra;
- c) Opções que podem ajudar os sistemas humanos e ecológicos a ajustar-se ou adaptar-se às novas condições climáticas e eventos.

A primeira e a segunda forma de intervenções são entendidas como ações mitigadoras, enquanto que a terceira é chamada de "adaptativa". A primeira forma de intervenção é preventiva, como a reduzir o uso de energia, parar o desmatamento e as mudanças para combustíveis não-fósseis, controlar a natalidade sendo outro exemplo de política preventiva. Entre os exemplos do segundo tipo de políticas de mitigação podemos citar o envio de partículas para estratosfera para alterar o albedo (refletividade) da Terra, ou o depósito de quantidades vestigiais de ferro nos oceanos para aumentar a taxa de precipitação de carbono para o seu fundo<sup>33</sup>.

As estratégias de adaptação às alterações climáticas são algo que a humanidade vem fazendo há muito tempo, e de diversas maneiras, desde o uso racional do ar condicionado até mudanças nos hábitos alimentares. É fundamentalmente importante reconhecer o amplo leque de ações possíveis para enfrentar a mudança climática, pois elas variam de grandes correções técnicas a simples mudanças de comportamento (KEMP, 1996, p. 153).

As contribuições do IPCC (2007) para o presente debate garantem uma importante base de análise para avaliação da nossa capacidade de adaptação e mitigação das emissões, disponível no Quadro 3.

---

<sup>33</sup> Segundo Kemp (2006, p. 153) essas intervenções são também entendidas como "políticas de engenharia do clima" ou "geo-engenharia". Até agora, as opções da geo-engenharia não têm recebido muita atenção no debate político, em parte, pela razão de que eles representam um risco para a sociedade em si.

Quadro 3 – Exemplos selecionados de tecnologias e políticas para mitigação setorial

Setor	As principais tecnologias de mitigação e práticas atualmente disponíveis comercialmente*	Políticas, medidas e instrumentos que mostraram-se ambientalmente eficazes
Abastecimento de Energia	Oferta e eficiência de distribuição; combustível, do carvão para o gás, energia nuclear; calor renovável e de energia (hidrelétricas, solar, eólica, geotérmica e bioenergia); produção combinada de calor e eletricidade; primeiras aplicações de captura e armazenamento de dióxido de carbono (CCS) (armazenamento do CO <sub>2</sub> removido do gás natural); <i>CCS para o gás, biomassa e carvão em instalações de geração de eletricidade, energia nuclear avançada; energia renovável avançada, incluindo a das marés e a energia das ondas, concentrador-solar e <u>solar fotovoltaica</u>.</i>	Redução de subsídios aos combustíveis fósseis, os impostos ou taxas de carbono dos combustíveis fósseis.  <i>Feed-in tariffs</i> para tecnologias de energia renovável; obrigações de energia renováveis; subsídios para produtores.
Transportes	Veículos mais eficientes, veículos híbridos, veículos a diesel mais limpo; bicombustíveis; modais de transporte rodoviário para o ferroviário e sistemas de transporte público, transporte não-motorizado (ciclismo, caminhada); uso da terra e planejamento de transportes, <i>os bicombustíveis de segunda geração, maior eficiência aeronaves; avançados veículos elétricos e híbridos com baterias mais potentes e confiáveis.</i>	Economia obrigatória de combustível; mistura de bicombustíveis e normas de CO <sub>2</sub> para o transporte rodoviário Os impostos sobre a compra e registro do veículos, sobre o uso de combustíveis e sobre estradas e estacionamentos. Influência da necessidade de mobilidade através de regulamentos de uso do território e planejamento da infraestrutura, investimento em transportes públicos de qualidade e em formas de transporte não motorizados.
Construções	Iluminação eficiente e iluminação natural; aparelhos elétricos, de aquecimento e de refrigeração mais eficientes; fogões com melhor isolamento; projeto solar ativo e passivo para aquecimento e arrefecimento; fluidos de refrigeração alternativos, valorização e reciclagem de gases fluorados; <i>projeto integrado de edifícios comerciais, incluindo tecnologias, tais como medidores inteligentes que fornecem controle, <u>energia solar fotovoltaica integrada em edifícios</u>.</i>	Padrões de decoração e rotulagem. Códigos de construção e certificação. Programas de gestão da demanda. Programas de liderança do setor público, incluindo contratos. Incentivos para empresas de serviços energéticos (ESCO).

\*Tecnologias e práticas de mitigação. Projetos para serem comercializados antes de 2030 em itálico.

Fonte: IPCC, 2007, p. 60

Se considerarmos que no ano de 2004, as emissões de GEE foram 26% derivadas do fornecimento de energia (eletricidade e aquecimento); 19% da indústria; 14% da agricultura; 17% de uso e mudanças do uso da terra (desmatamento); 13% dos transportes; 8% do uso residencial, comercial e setores de serviços e 3% a partir de resíduos, a energia FV tem potencial de mitigação de emissões nos setores responsáveis pelo maior impacto nas emissões de carbono – abastecimento de

energia, transporte e construção, setores que são responsáveis por aproximadamente 39% das emissões totais (IPCC, 2007, p. 104).

Diante da dificuldade de estabelecimento de prioridades para ações de diminuição de GEE, a análise da curva de custo de abatimento de emissões de gases de efeito estufa elaborada pela *McKinsey & Company*<sup>34</sup> fornece uma base quantitativa de 200 oportunidades de redução de emissão de GEE. A base de dados para redução dos GEE, permite o estabelecimento de discussões sobre quais ações seriam as mais eficazes na redução de emissões e qual o custo de cada uma delas. A partir deste estudo é possível um mapeamento global de oportunidades para reduzir as emissões de GEE entre 10 grandes setores e 21 regiões do mundo até 2030.

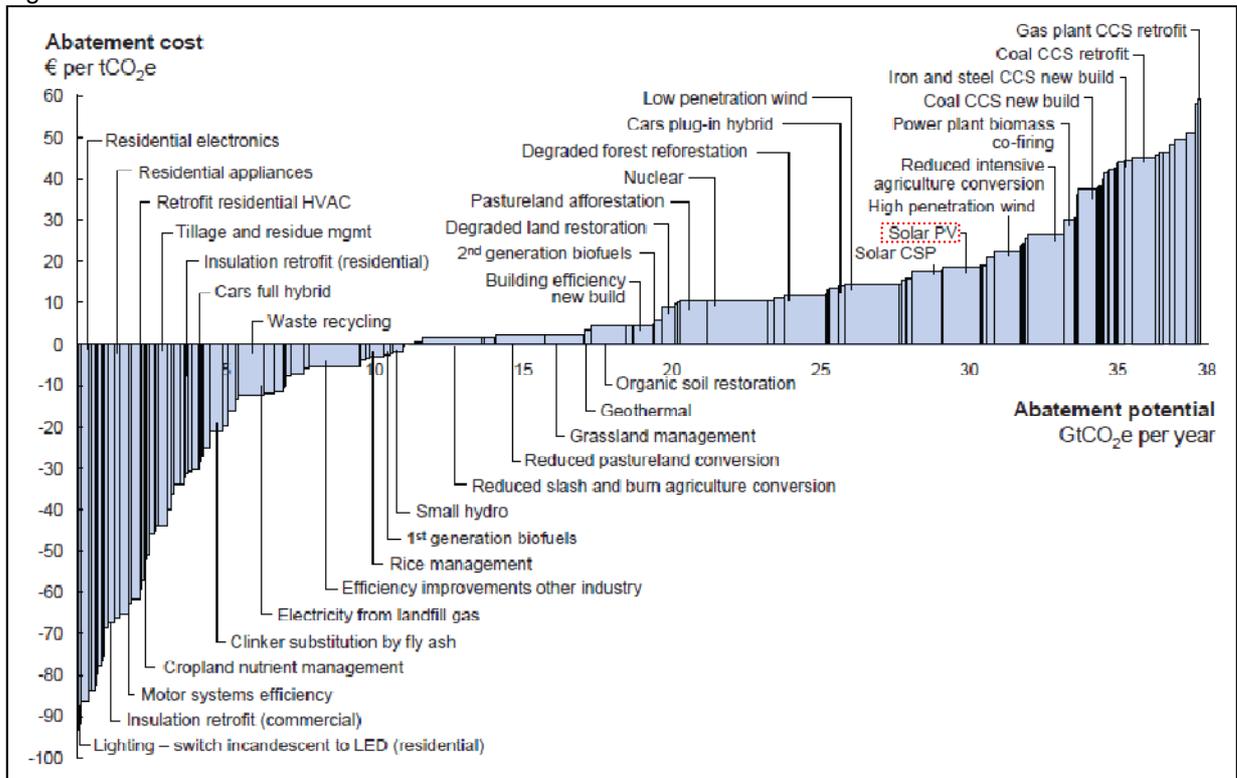
Mesmo que a precisão destas estimativas seja passível de questionamento, elas certamente estão ajudando a definir prioridades nas estratégias nacionais de transição ao baixo carbono. A definição de prioridades ocorre no contexto em que países discutem metas ambiciosas para reduzir as emissões GEE e conjuntamente, se estabelece um intenso debate sobre a viabilidade técnica e econômica, em que oportunidades de redução de emissões devem ser perseguidas com diferentes opções de custo.

As opções são as mais diversas e entre as que refletem economias por tonelada evitada ao invés de custos, podemos citar o isolamento térmico das edificações, o fim do modo *stand-by* dos eletrodomésticos e o uso do etanol e cana-de-açúcar. Com custos inferiores a €20 por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada encontram-se a utilização da energia nuclear, do etanol de celulose, do manejo apropriado, do reflorestamento e principalmente a energia solar FV. Com custos relativamente mais elevados, entre €20 e €40 por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada estão ações para conter o desmatamento de florestas tropicais e sistemas de captura e armazenamento de carbono.

---

<sup>34</sup> Estudo realizado em parceria com empresas e instituições como *A Carbon Trust, Climate Works, Enel, Entergy, Holcim, Honeywell, Shell, Vattenfall, Volvo e WWF*. Disponível em <<http://www.mckinsey.com/>>.

Figura 3 – A curva de custo de abatimento de emissões



Fonte: MCKINSEY, 2009, p. 7.

As conclusões deste estudo afirmam existir um potencial, até 2030, para reduzir as emissões de GEE em 35% em comparação aos níveis de 1990, ou 70% em comparação aos níveis que veríamos em 2030 caso nada fosse feito no sentido de reduzir as emissões atuais e futuras. Se as ações mencionadas fossem colocadas em prática, seriam suficientes para alcançar a meta do IPCC em manter o aquecimento global abaixo do limite de dois graus Celsius. Essa meta se constitui um grande desafio, pois todas as regiões e setores terão de capturar perto do potencial de redução que está disponível para elas e um atraso de dez anos na implementação de ações torna praticamente impossível seu alcance (MCKINSEY, 2009, p. 7-9).

Mesmo em estimativa claramente otimista, esse conjunto de ações são estimados a um custo, em todo mundo, de € 200 a 350 bilhões anuais até 2030, o que representa menos de 1% da previsão do PIB global em 2030. Os financiamentos dos esforços de redução são estimados em € 530 bilhões por ano em 2020 ou € 810 bilhões por ano em 2030 (MCKINSEY, 2009, p. 7-9).

Cabe ressaltar que o potencial de abatimento de emissões da energia FV não é um consenso entre especialistas. Em recente estudo Baker, Chon e Keisler (2009) apresentaram resultados de um levantamento de especialistas sobre as perspectivas de mudanças técnicas avançadas em energia solar FV e suas conclusões afirmam que mesmo significativos avanços técnicos em FV resultarão em efeitos relativamente pequenos sobre a curva de custo de abatimento de emissões. No entanto, quando esses avanços são combinados com as melhorias em armazenamento, os impactos são mais significativos. Isso significa que são cruciais as interações entre as tecnologias, e o impacto sobre o custo de abatimento vai além da simples melhoria de custos.

As principais contribuições desses estudos consistem em classificar as diversas formas de ações, racionalizar os esforços dos agentes empenhados em processos de transição, além de definir prioridades por meio de diversos critérios, como os custos envolvidos. Como foi apresentada, a energia FV detém grande potencial de mitigação e abatimento de carbono, o que não significa afirmar que sozinha será capaz de equacionar todos os problemas relacionados às emissões de carbono, pois a complexidade do tema envolve um emaranhado de questões ambientais, econômicas, sociais e tecnológicas como o contexto internacional, a ser analisado na próxima seção.

#### **1.2.4 A questão das emissões no contexto internacional**

Em termos da análise econômica, o uso dos recursos ambientais como a atmosfera não seria problemático se condições de eficiência fossem obedecidas<sup>35</sup>. No entanto, o uso de um recurso como atmosfera gera custos e benefícios que não são captados no sistema de mercado, ainda que estes recursos tenham um valor econômico, não lhes são atribuídos preços adequados. O problema é justificado pelo fato da atmosfera ser bem público, ou seja, seus direitos de propriedade não são completamente definidos e

---

<sup>35</sup> Uma das soluções para o problema da incapacidade do sistema de preços em valorar e refletir o custo de oportunidade da atmosfera como bem público, está sendo dado por um mercado que regula a compra e a venda de créditos de carbono, que são certificados emitidos para um agente que reduziu a sua emissão de gases de efeito estufa (GEE).

assegurados e, portanto, suas trocas com outros bens acabam não se realizando eficientemente por meio do mercado (MOTTA, 2006, p. 180).

Como ainda não dispomos de um mecanismo consistente para monitorar o desenvolvimento sustentável em escala global, a consolidação de um consenso no sentido de utilizar as emissões de carbono como indicador global de sustentabilidade, faz deste debate uma das principais orientações para a discussão sobre o desenvolvimento sustentável, tendo em vista a sua importância no controle das emissões de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas resultantes<sup>36</sup>.

Entretanto, o desejo de empenhar todos os esforços no sentido de tornar as mudanças climáticas o principal problema a ser enfrentado pela sociedade não é compartilhado por todos. Um exemplo é o caso do Consenso de Copenhague, que se trata de um grupo de pesquisadores vinculado ao *Copenhagen Business School*, que orienta os governos sobre o gasto de recursos com vistas ao desenvolvimento, através de análise de prioridades de despesas correntes. Esses estudos se propõe a subsidiar a comunidade internacional na solução dos maiores desafios da sociedade e como fazê-lo da forma mais rentável possível<sup>37</sup>.

Os resultados deste Consenso, formulados em 2008, destacaram trinta ações em ordem de prioridade, quais sejam: suplementos de micronutrientes para crianças (vitamina A e zinco); agenda de desenvolvimento de Doha; fortificação de micronutrientes (ferro e iodação do sal); cobertura vacinal expandida para as crianças e biofortificação. As ações para o desafio das mudanças climáticas foram: P&D em tecnologias de baixo carbono; P&D e mitigação; e Mitigação apenas, e estão priorizadas nas posições 14<sup>o</sup>, 29<sup>o</sup> e 30<sup>o</sup>, respectivamente.

---

<sup>36</sup> Reconhecemos que a orientação não deve excluir a percepção das demais formas de ações antrópicas que geram externalidades ambientais e que interferem nos objetivos de se alcançar um modelo de desenvolvimento sustentável.

<sup>37</sup> Não é objetivo do presente trabalho uma ampla revisão de todas as questões tratadas pelo Consenso de Copenhague, para saber mais acesse: <<http://www.copenhagenconsensus.com/>>.

É sempre muito útil e benéfico para toda sociedade a priorização de esforços baseados em evidências e metodologias de mensuração, como a utilização da análise custo benefício, especialmente quando os recursos são limitados. No entanto, ao enfatizar os problemas de curto prazo, a análise em questão não deve destoar os esforços para grandes desafios de longo prazo como as mudanças climáticas, que como tal Consenso conta com o reconhecimento de uma significativa parcela da comunidade científica.

Além deste debate, a análise da emissão de carbono distribuída geograficamente por grandes grupos de nações nos remete a discussão de indicadores de intensidade como mecanismos de mensuração da sustentabilidade do desenvolvimento. Ao mesmo tempo, a análise permite estabelecer as metas e controle de emissão de carbono dos diferentes países. Em linhas gerais, a intensidade de carbono é uma comparação entre a quantidade de emissões por unidade de produção, medida pelo PIB.

Esse indicador de intensidade de carbono vem caindo no mundo inteiro, mesmo em países em desenvolvimento como o caso da China, como efeito de uma eficiência tecnológica superior a adotada anteriormente. Entretanto os efeitos do crescimento populacional somados ao aumento dos padrões de qualidade de vida contrabalançam este efeito na economia. Um exemplo é o comparativo entre as intensidades de carbono da economia global em 1990 e 2007, descritas no Quadro 4.

Quadro 4 – Comparativo da intensidade de carbono na economia global entre 1990 e 2007

<i>Ano</i>	<i>Intensidade de dióxido por dólar</i>	<i>População</i>	<i>Renda média</i>	<i>Emissões Globais</i>
1990	860g	5,3 bilhões	US\$ 4.700,00	21,7 bilhões
2007	760g	6,6 bilhões	US\$ 5.900,00	30,0 bilhões

**Fonte:** VEIGA (2009, p. 45).

A análise desses dados nos permite concluir que a intensidade de carbono pode estar caindo muito, mas isso não impede que o volume das emissões continue a aumentar. Este fato também contraria argumentos que enfatizam a mudança de comportamento, como uma forma de permitir uma eficiência energética maior e até diminuir a necessidade de energia. Contudo, autores vêm demonstrando que quando se obtém

eficiência para determinada atividade, esta é também compensado por um *rebound effect* (efeito ricochete)<sup>38</sup>.

Efeitos como este demonstram a complexidade sistêmica deste problema. Além dessa questão o fato das políticas atuais não se mostrarem suficientes para conter o aumento da concentração de GEE na atmosfera fez com que este debate fosse levado para arenas internacionais promovidos pela ONU. Sendo o carbono o principal responsável pelo acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, sua emissão se transformou na “moeda” de negociação internacional.

Em maio de 1992, quatro anos após a consolidação do IPCC, a ONU através do PNUMA, estabeleceu os fundamentos do complexo processo institucional que seria a Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima (UNFCCC, em inglês). Assinada por mais de 189 nações, a referida Convenção conseguiu chegar ao mais próximo do que chegou a uma unanimidade global<sup>39</sup>. A UNFCCC compromete as nações signatárias a um objetivo de longo prazo para a estabilização de emissão de GEE, num nível que evitaria uma interferência antrópica perigosa no sistema climático.

Anualmente, os países signatários da Convenção se reúnem na Conferência das Partes (COP) para discutirem questões sobre mudanças climáticas. Ainda que não tenhamos como objetivo relatar com aprofundamento todos os seus acontecimentos, um breve histórico da sua realização segue no Quadro 5.

---

<sup>38</sup> Um exemplo desse efeito seria a troca de um carro altamente poluente para outro mais eficiente, que garante uma eficiência energética com um gasto menor de combustível, economia que pode proporcionar uma viagem nas férias. Ou seja, essa poupança tende a se transformar em outro gasto que demanda energia. Esses estudos se mostram importantes para que se verifique que a redução das emissões não ocorre na mesma proporção em que a chamada intensidade diminui (SORELL, 2007).

<sup>39</sup> Em segundo lugar está o Tratado de não-proliferação de Armas Nucleares, de 1968, que chegou a ter 187 adesões antes da retirada da Coreia do Norte, em 2003 (VEIGA, 2009, p. 10).

Quadro 5 – Linha do tempo das negociações sobre mudança do clima

Ano	Conferencia das Partes (COP)	Principais resultados
1995	COP 1 – Berlim, Alemanha	Mandato de Berlim – Destaque para a necessidade de criação de um protocolo contendo metas de redução de emissões e um protocolo contendo metas de redução de emissões a ser apresentado até a COP 3.
1996	COP 2 – Genebra, Suíça	O 2º Relatório do IPCC foi considerado como referência para subsidiar ações futuras.
1997	COP 3 – Quioto, Japão	Protocolo de Quioto – Apresenta metas de redução de emissão de carbono para os países desenvolvidos de 5,2% em relação aos níveis de 1990 para o primeiro período de compromisso (1998-2012) e os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, único aplicável ao Brasil; Implementação conjunta e mercado de emissões.
1998	COP 4 – Buenos Aires, Argentina	Plano de Ação de Buenos Aires e definição sobre um cronograma de trabalho para atividade do Protocolo de Quioto até a COP 6.
1999	COP 5 – Bonn, Alemanha	Discussão sobre o Protocolo de Quioto.
2000	COP 6 – Haia, Holanda (Parte 1)	Não se chegou a um acordo.
2001	COP 6 – Bonn, Alemanha (Parte 2)	Um acordo foi negociado para as discussões sobre o Protocolo de Quioto – Foco na ratificação do protocolo de Quioto, mas com muitas incertezas.
2001	COP 7 – Marrakesh, Marrocos	Foco na ratificação do Protocolo de Quioto e muitas expectativas.
2002	COP 8 – Nova Delhi, Índia	Declaração de Nova Delhi – Foco mitigação de gases de efeito estufa e redução de vulnerabilidades. As partes do Protocolo de Quioto concordaram sobre regras e procedimento de MDL e forneceram orientações para o Fundo para países menos desenvolvidos – <i>Last Developed Countries</i> (LDC's).
2003	COP 9 – Milão, Itália	Destacou o impasse entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, e a complexidade das negociações.
2004	COP 10 – Buenos Aires, Argentina	Discussão sobre as diversas formas de promover a participação de outros países no processo: Necessidade de comprovação da redução de emissões e GEE pelos desenvolvidos.
2005	COP 11 – Montreal, Canadá	Implementação do Protocolo de Quioto e discussão sobre o seu funcionamento, bem como o da Convenção. Iniciado processo para discutir as ações de longo prazo para combater as mudanças climáticas.
2006	COP 12 – Nairóbi, Quênia	Sediada na África, foi dado um enfoque nos países mais vulneráveis e nos temas adaptação e capacitação. O Brasil apresentou a proposta para incentivos positivos para reduzir emissões oriundas de desmatamento e da degradação de Florestas (REDD) em nações em desenvolvimento.
2007	COP 13 – Bali, Indonésia	Mapa do Caminho de Bali ( <i>Bali Road Map</i> ) e os “ <i>building blocks</i> ” – trás os trilhos de negociação: Grupo de Trabalho Ad Hoc sobre Ação Cooperativa de Longo Prazo no âmbito da Convenção (AWG-LCA, em inglês) e o Grupo de Trabalho Ad Hoc sobre o Protocolo de Quioto (AWG-KP, em inglês).
2008	COP 14 – Poznan, Polônia	Reuniões do AWG-LCA e AWG-KG além da SBI e SBSTA.
2009	COP 15 – Copenhagen, Dinamarca	Não conseguiu articular um novo tratado climático. Reconhece que é necessário evitar a elevação da temperatura do planeta acima de 2º C, mas não especifica obrigações e ações para que tal objetivo seja alcançado.

Fonte: Elaboração própria a partir de SANTOS, 2009.

A COP-3, sediada no Japão no ano de 1997, teve sua importância ao culminar na ratificação por mais de 160 nações do Protocolo de Quioto, que representou um grande avanço na tentativa de mitigar os danos provenientes do aquecimento global. Sua definição envolve metas para países industrializados (média 5,2% inferior aos níveis de 1990 – 1º período de compromisso 2008-12); e apresenta três mecanismos principais de flexibilização, quais sejam: Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), Implementação Conjunta e Mercado de emissões. A não ratificação deste protocolo pelo governo norte-americano, no ano de 2001, deixou de fora o principal emissor de gases do mundo, muito embora a adesão da Rússia, em 2004, fizesse com que o tratado passasse a ter os requisitos formais necessários para seu início<sup>40</sup>.

Diferente da omissão anterior, o evento mais recente da conferência das partes (COP-15), realizado em dezembro de 2009 em Copenhague na Dinamarca, contou com a participação mais efetiva do principal emissor mundial, os Estados Unidos. E se considerarmos o consenso um fator crítico para a Conferência, a COP-15 ficou longe de elaborar uma proposta negociável entre nações com direito a voto nas assembleias da cúpula do clima, em parte explicada pelo fato das decisões no sistema da Organização das Nações Unidas não serem aprovadas se apenas uma nação rejeitar a proposta. Esses fatos revelam a complexidade da construção de um arranjo de governança global<sup>41</sup>.

Essa estrutura de decisão da Conferência resultou na equiparação das negociações no mesmo nível de interesses e responsabilidades<sup>42</sup>. Um exemplo deste efeito foi o esboço previamente acordado com 42 nações que representam quase a totalidade de emissões. O acordo poderia ter sido aprimorado na primeira semana para ganhar robustez e formar uma base sólida para a decisiva segunda semana. Por mais que

---

<sup>40</sup> O critério é a ratificação, aceitação, aprovação ou adesão de países que contabilizem juntos, pelo menos 55% da quantidade total de gases de efeito estufa em 1990 (COSTA, 2005).

<sup>41</sup> Dos 192 países participantes compareceram apenas 119, representados por seus presidentes ou primeiros-ministros.

<sup>42</sup> Uma das falhas ocorreu quando credenciou 45 mil participantes superlotou o recinto que comportava no máximo 15 mil, tumultuando os trabalhos e culminando num confronto entre polícia e credenciados barrados.

pudesse ser complicado o entendimento com os demais países candidatos as primeiras vítimas das mudanças climáticas. Mesmo com os tímidos resultados alcançados, não devem ser omitidos avanços como a regulamentação dos mecanismos de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação (REDD), de mitigação (Namas, na sigla em inglês) e de transferência de tecnologia.

Neste sentido uma questão que se coloca é “se os avanços no combate ao aquecimento global são benéficos a todos e o retrocesso igualmente prejudicial, o que dificulta a construção de cooperações para um acordo multilateral?” A resposta para esta questão considera três constatações principais. Primeiramente, uma ação conjunta global exige que cada país incorra em custos elevados em troca de benefícios comuns, e se esses esforços nacionais não puderem ser verificados, criam-se oportunidades para que uns se beneficiem com as ações dos outros, sem ônus algum. Em segundo lugar, se a distribuição dos impactos do aquecimento global é incerta e percebida diferentemente por cada um, as chances de cooperação ficam ainda mais difíceis; e por último, os GEE ao permanecerem por mais de cem anos na atmosfera, atribuem responsabilidades diferenciadas pela geração do problema, pois as emissões passadas são relevantes. Fato reconhecido na Convenção, mas cuja aplicação dependerá da trajetória também das emissões futuras.

Ao longo dos anos, as conferências das partes consideraram as diferentes responsabilidades históricas pelo fenômeno, baseadas nos volumes de suas emissões antrópicas<sup>43</sup>. Essa abordagem histórica foi fundamental para a definição de responsabilidades comuns, porém diferenciadas, que direcionam as obrigações de países diversos. Ao adotar a abordagem histórica como único critério para definição de responsabilidades na estabilização da concentração de gases na atmosfera, o formato institucional levou a uma separação dicotômica em que os países em desenvolvimento

---

<sup>43</sup> O Princípio das “Responsabilidades Comuns porém diferenciadas” – Responsabilidade histórica dos Países – diz que todos países devem reduzir suas emissões de gases de efeito estufa, porém o comprometimento daqueles que mais emitiram ao longo da história deverá ser maior.

não precisam se comprometer em conter suas emissões e os desenvolvidos assumiriam irrisórias metas de redução<sup>44</sup>.

No entanto, esse argumento deve considerar que países com uma economia desenvolvida podem mais facilmente atingir uma estabilidade no nível de emissões enquanto os países emergentes ainda terão que ampliar consideravelmente o consumo de energia e as emissões de carbono. Como nações em desenvolvimento estão crescendo mais que as economias já desenvolvidas, poderão ter uma contribuição histórica equivalente à dos EUA e da Europa já em 2030<sup>45</sup>.

O impasse prevalecido na COP-15 pode ter ocorrido pelo fato dos indivíduos duvidarem da possibilidade de cooperação. Dessa maneira, a estratégia de maior retorno poderá ser a de não cooperar, o que reforça a tese popularizada por Hardin (1968), como a "tragédia dos comuns" em que o livre acesso e a demanda irrestrita de um recurso finito, terminam por condenar estruturalmente o uso do recurso por conta de sua superexploração.

Contudo, a transição ao baixo carbono ainda que dependa em grande parte da ação dos grandes emissores globais, não está sujeita apenas a acordos viabilizados no âmbito das COP's. Como representa um processo maior, envolve outras instâncias de governabilidade, que são guiadas por dois outros vetores, que inclusive tem se mostrado mais decisivos, que são as preocupações com a segurança energética e as oportunidades de mercado geradas por esta nova onda de desenvolvimento baseada no baixo carbono que, se espera, transforme o sistema energético mundial.

---

<sup>44</sup> Para o mesmo autor é discutível que a responsabilidade possa ser atribuída às gerações que usaram e abusaram do uso de energias fósseis quando o estrago nem era do seu conhecimento. Em outros termos, as responsabilidades pelas emissões só deveriam ser avaliadas a partir da data em que houve seu reconhecimento coletivo como a principal causa do aquecimento global (VEIGA, 2009, p. 12).

<sup>45</sup> Para os Estados Unidos, o estabelecimento de metas de emissão num modelo de desenvolvimento intensivo em carbono conduziria a limitação do crescimento de uma economia que emerge de uma crise. Já para China, o desafio de urbanizar é garantir condições mínimas para milhares de indivíduos de sua sociedade. Da mesma forma, as contribuições destes dois países consistem: na liderança incontestável em ciência e tecnologia dos Estados Unidos, que registra mais da metade de tecnologias de baixo carbono e o monumental estoque de capital físico da China (MOTTA, 2009).

## **CAPÍTULO 2**

### **ELEMENTOS PARA UMA TRAJETÓRIA TECNOLÓGICA SUSTENTÁVEL**

O presente capítulo abordará os principais aportes da teoria econômica da inovação com ênfase evolucionária para a questão ambiente e desenvolvimento. Seu primeiro objetivo é analisar historicamente como as inovações dos séculos XVIII e XIX provocaram o aprisionamento a uma sequência de tecnologias baseadas em combustíveis fósseis como o carvão, petróleo e o gás natural. Diante do desafio de constituir uma trajetória tecnológica sustentável, examinamos os esforços teóricos para gerenciar transformações de longo prazo do sistema energético. Ao avaliar as possibilidades para inserção da tecnologia FV, procura-se compreender como os mecanismos institucionais e estratégias de desenvolvimento possibilitam sua difusão e propiciam o crescimento do mercado mundial dessa energia.

#### **2.1 Paradigmas tecnológicos e sistemas energéticos: uma interpretação proposta**

O período que compreende a segunda metade do século XVIII transformou a história recente da humanidade por meio de um conjunto de invenções na indústria de algodões, na Inglaterra, em que o sistema fabril emergiu como um novo modo de produção, que logo se expandiu para demais nações. Outros ramos industriais, de diferentes países, também promoveram avanços comparáveis, todos unidos e se reforçando mutuamente possibilitaram avanços em frentes cada vez mais amplas.

A grande variedade de inovações impossibilita sua compilação, mas é possível agrupá-las em três grupos: a substituição da habilidade e do esforço humano pelas máquinas, que se apresentavam como rápidas, constantes, precisas e incansáveis; a substituição das fontes animadas de energia por fontes inanimadas, em especial a introdução de máquinas para transformar calor em trabalho, dando ao homem acesso quase ilimitado a energia; e o uso de novas matérias-primas mais abundantes, substituindo em particular o uso de substâncias vegetais ou animais por minerais.

O momento histórico conhecido como Revolução Industrial, teve sua origem na Inglaterra no século XVIII, mas logo se disseminou, desigualmente para Europa continental. De acordo com Landes (1994, p. 5-6) em um intervalo que mal chegou a

duas gerações, as inovações tecnológicas dos séculos XVIII e XIX modificaram profundamente a vida do homem ocidental ao transformar uma sociedade baseada na economia agrária e dominada pela habilidade artesanal, para uma economia baseada na indústria e na fabricação mecanizada. Esse intenso processo de transformação constituiu paradigmas que atingem todas as áreas do conhecimento, fazendo com que a ciência e a tecnologia tenham importância cada vez maior para a economia.

Destaca-se que a conceituação destas transformações paradigmáticas pressupõe o entendimento da analogia com a idéia de paradigma científico, estudado por Thomas Kuhn (2001, p. 218) em sua obra intitulada “*A Estrutura das Revoluções Científicas*” e compreendido como “[...] um solucionador de quebra-cabeças que, empregadas como modelos ou exemplos, podem substituir regras explícitas como base para a solução do restante dos quebra-cabeças da ciência normal”<sup>46</sup>.

Ao servir como referencial na busca por solução de problemas, os paradigmas científicos adquirem uma posição de destaque “[...] porque são mais bem sucedidos que seus competidores na resolução de alguns problemas que o grupo de cientistas reconhece como grave” (KUHN, 2000, p. 44). Acrescenta-se que ao adquirir esse paradigma, a comunidade científica traz consigo um critério para a escolha de problemas que, durante a sua vigência, podem ser considerados dotados de uma solução possível (KUHN, 2000). No seu início, o paradigma surge como uma promessa de sucesso, entretanto, esse sucesso não garante a solução de todos os problemas no interior do sistema. A ciência normal consiste na atualização dessa promessa, que é obtida:

[...] ampliando-se o conhecimento daqueles fatos que o paradigma apresenta como particularmente relevantes, aumentando a correlação entre esses fatos e as predições do paradigma e articulando-se ainda mais o próprio paradigma (KUHN, 2000, p. 44).

---

<sup>46</sup> No sentido corriqueiro em que empregamos o termo, indica aquela categoria particular de problemas que servem para testar nossa engenhosidade ou habilidade na resolução de problemas (KHUN, 2001, p. 59).

Análogo ao conceito de paradigma científico de Kuhn (2000), os paradigmas tecnológicos são também concebidos como um “modelo” e um “padrão” de solução de problemas baseados em princípios selecionados, derivados das ciências naturais, e em tecnologias materiais selecionadas (DOSI, 1984, p. 14).

Esse paralelo não pode ser considerado uma identidade. O “conhecimento tecnológico” é muito menos articulado que o “conhecimento científico”, pois grande parte dele não foi escrito e está implícito na experiência e na habilidade dos agentes, o que faz com que o conceito de paradigma tecnológico proposto seja mais vago que o conceito de paradigma científico descrito por Kuhn (2000). Dessa forma, essa aproximação será mais conveniente em determinados casos e menos em outros, embora conserve sua validade e represente *gestalten* fortemente seletivas incorporando heurísticas poderosas (DOSI, 1984, p. 15-16).

Freeman e Soete (1997) na obra *The Economics of Industrial Innovation*, avançaram nas idéias de Kuhn (2000), e investigaram, de forma histórico-descritiva, as ondas de progresso técnico que Schumpeter tratou em sua obra *Business Cycles* como “revoluções industriais sucessivas”<sup>47</sup>.

O conceito schumpeteriano de revoluções industriais sucessivas seguiu a descrição de ciclos longos do economista russo Nicolai Kondratieff (1925). Nessa concepção, os ciclos possuem duração aproximada de meio século e são chamados por muitos economistas como “ondas” ou “fases”. O Quadro 6 reproduz o esforço de sistematização das ondas longas, baseadas em transformações tecnológicas de Freeman e Soete (1997, p. 18)<sup>48</sup>.

---

<sup>47</sup> Ainda que as flutuações de longo prazo na economia – tendências de preços, variações na taxa de juros e dos fluxos comerciais – tenham sido debatidas extensivamente por economistas como Jevons, Pareto e Dupriez, é creditado a Schumpeter (1939) e a Van Geldere (1913) o pioneirismo em explicar as ondas longas de crescimento em função da introdução de novas tecnologias no sistema econômico (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 18).

<sup>48</sup> Seguindo recomendações do próprio Schumpeter para que seus sucessores seguissem modelos baseados em novas pesquisas, os resultados de Freeman e Soete (1997) não seguem seu esquema de modo preciso.

Quadro 6 – Ondas sucessivas de mudança técnica

Ondas longas ou ciclos		Características-chave da infra-estrutura dominante			
Período aproximado	Ondas de Kondratieff	Ciência, tecnologia, ensino e treinamento	Transportes e comunicações	Sistemas energéticos	Fatores-chave universais e de baixo custo
<u>Primeira</u> 1780-1840	Revolução industrial: produção em fábricas têxteis	Aprendizado, aprender fazendo, escolas de dissidentes, sociedades científicas Profissional de Engenharia Civil e Mecânica, institutos de tecnologia, massificação do ensino primário Laboratórios industriais de P&D,	Canais, transporte rodoviário	Energia hidráulica	Algodão
<u>Segunda</u> 1840-1890	Era da energia a vapor e das ferrovias	laboratórios nacionais de Química e Eletricidade, laboratórios de padronização	Ferrovias (trilhos de ferro), telégrafo	Máquinas a vapor	Carvão, ferro
<u>Terceira</u> 1890-1940	Era da eletricidade e da siderurgia	P&D industrial e governamental em larga escala, massificação do ensino superior	Ferrovias (trilhos de aço), telefone	Eletricidade	Aço
<u>Quarta</u> 1940-1990	Era da produção em massa ("Fordismo") de automóveis e de matérias sintéticas	Rede de dados, redes globais de P&D	Auto-estradas, rádio e TV, linhas aéreas	Petróleo	Petróleo, plásticos
<u>Quinta</u> 1990-?	Era da microeletrônica e da redes de computadores		Canais de informação, redes digitais	Gás/Petróleo	Microeletrônicos

Fonte: FREEMAN; SOETE, 1997, p. 19, tradução nossa.

Segundo Freeman e Perez (1988, apud VILLASCHI, 2004, p. 66) a manifestação destes paradigmas em sua totalidade exige uma convergência entre disponibilidade tecnológica, viabilidade econômica e possibilidade institucional. Nesse sentido, o requisito para a instauração de um paradigma tecnológico é a ocorrência de uma crise,

seguida de ajustes estruturais que alterem a principal força motriz do crescimento econômico em escala mundial.

Após a instauração de um paradigma o fator crítico para sua difusão por todo tecido econômico, segundo Perez (1983, apud FREEMAN; SOETE, 1997, p. 38), é a oferta crescente a custos decrescentes de fatores de produção da infraestrutura dominante, conforme ocorrido com algodão na primeira fase da Revolução Industrial; com carvão e o ferro na era da energia a vapor; com aço na era da siderurgia; e com o petróleo na era da produção em massa.

More generally, it has also been suggested that major clusters of prevailing technological paradigms (e.g., those related to oil-based synthetic chemistry, to electromechanical production, or, more recently, to microelectronics) involve the intensive utilization of some crucial input abundantly available at low cost (e.g., energy in the former two examples, and information-processing in the latter) (PEREZ, 1987, apud DOSI, 1988, p.1130).

Em cada um dos paradigmas descritos no Quadro 6, uma característica central é a utilização de quantidades cada vez maiores de energia em sua infraestrutura. Em consonância com o escopo deste trabalho, é especialmente interessante compreender o papel dos sistemas energéticos nas sucessivas ondas de mudança técnica e como foram constituídas as trajetórias tecnológicas na direção de cada um dos sistemas energéticos.

Sobre a discussão destas questões Rosenberg (1982) afirma que grande parte da duas Revoluções Industriais, ocorridas nos séculos XVIII e XIX, pode ser sistematicamente resumida como uma introdução amplamente difundida de técnicas, com o intuito de explorar o carvão como uma nova fonte de energia na indústria e nos transportes. O impulso no sentido da difusão da industrialização nos paradigmas seguintes teve como núcleo central inovações que permitiram o domínio de uma sequência de tecnologias baseadas numa sucessão de combustíveis fósseis como o carvão, petróleo e o gás natural. No século seguinte, a conversão de combustíveis e de força hidráulica numa nova forma de energia, a eletricidade, representaria a manutenção da sequência tecnológica a partir de fontes energéticas de combustão.

Este fenômeno que impulsiona as tecnologias no sentido de sua difusão é conhecido como trajetória tecnológica e pode ser definido como “[...] *the activity of technological process along the economic and technological trade-offs defined by a paradigm*”. (DOSI, 1988, p.1128). Portanto, se constitui como o possível caminho a ser seguido pelo progresso técnico no contexto de um determinado paradigma. Outra forma de se perceber uma trajetória tecnológica é imaginá-la “[...] *a cylinder in the multidimensional space defined by these technological and economic variables* (DOSI, 1984, p.17). Podemos ainda destacar certas características dessas trajetórias, definidas em termos dos seus paradigmas a partir de Dosi (1984, p. 17-18):

- a) Podem ser mais genéricas ou mais circunscritas, assim como mais poderosas ou menos poderosas;
- b) Estas são geralmente complementaridades entre diversas formas de conhecimento, experiências, habilidade e etc. Além disso, os desenvolvimentos ou falta deles em certas tecnologias podem estimular ou impedir desenvolvimentos em outros;
- c) No sentido do modelo proposto, a fronteira tecnológica é definida como o mais alto nível alcançado em relação a uma trajetória, com respeito às dimensões tecnológicas e econômicas relevantes;
- d) É provável que o “progresso” numa determinada trajetória tecnológica conserve certos aspectos cumulativos, neste caso, a probabilidade de desenvolvimentos futuros se relaciona com a posição que empresas ou países ocupam em termos da fronteira tecnológica existente;
- e) Quando uma trajetória é muito poderosa, pode haver dificuldades em mudar para uma trajetória alternativa e sempre que um paradigma muda, temos de partir quase do início na atividade de resolução dos problemas;
- f) É questionável a possibilidade de comparar e avaliar, *a priori*, a superioridade de certa trajetória tecnológica em relação à outra. Esta é uma das razões por trás da natureza muito incerta da atividade de pesquisa (mesmo deixando de lado as

avaliações do mercado sobre os resultados e considerando apenas indicadores puramente tecnológicos).

A questão fundamental deste debate gira em torno da compreensão de como as trajetórias são selecionadas entre outras possíveis no âmbito dos paradigmas tecnológicos. Sem desconsiderar a influência decisiva dos ambientes econômico e tecnológico sobre a ciência, uma das respostas é que, ao longo da corrente ciência-tecnologia-produção, as forças econômicas em conjunto com fatores sociais e institucionais funcionam como um dispositivo seletivo ou “dispositivo de focalização”, no sentido de Rosenberg (1976), diante de uma série de possibilidades de direções de desenvolvimento possíveis e permitidas pela ciência. Com a consolidação do paradigma tecnológico, temos também definidas as atividades de resolução de problemas que tem como objetivo o “progresso técnico”. A direção deste progresso técnico é que define mais precisamente as trajetórias reais seguidas dentro de um conjunto maior de trajetórias possíveis (DOSI, 1984, p. 16-17).

Na atualidade, a concepção de “dispositivos de focalização” pressupõe uma análise histórico-descritiva das forças econômicas e dos fatores sociais e institucionais que determinaram as trajetórias tecnológicas em paradigmas anteriores. Esta proposta de análise, a ser desenvolvida nas próximas seções, considera a segmentação do sistema energético em três partes: as fontes de energia propriamente ditas, os motores e a transformação da energia em movimento e a distribuição de energia<sup>49</sup>. Assim, será possível analisar estes sistemas sobre diversos aspectos no contexto das mudanças técnicas, para constituição de trajetórias no contexto de seu paradigma tecnológico. A análise será especialmente útil na compreensão da origem do atual paradigma, possibilitando, em conjunto com o arcabouço teórico proposto na seção anterior, a proposição de trajetórias futuras alternativas.

---

<sup>49</sup> Sabendo que a eletricidade não se trata de uma fonte de energia, mas de uma forma, nesta parte situamos a mesma como uma inovação tecnológica.

### **2.1.1 O aprisionamento *lock-in* do sistema energético**

A primeira onda de mudanças tecnológicas foi impulsionada pela mecanização, baseada na energia hidráulica e esteve basicamente confinada às indústrias têxteis. Somente a partir da segunda onda, quando se consolidou a utilização da energia a vapor e das ferrovias no processo produtivo, foi possível a mecanização em outras indústrias.

A discussão proposta por Landes (1994, p. 7) mostra que a invenção e a difusão da máquina na indústria têxtil fez surgir a demanda pelo carvão como uma nova fonte de energia para motores a vapor. O resultado foi que os motores, assim como as próprias máquinas, tinham um apetite voraz por ferro, o que reclamava mais carvão e energia, na manutenção deste modelo de produção industrial.

A introdução de máquinas, que transformavam o calor em trabalho através da exploração em larga escala do carvão como um novo combustível, constituiu em um marco histórico da substituição de fontes animadas por fontes inanimadas de energia. Ou seja, o desenvolvimento da indústria mecanizada e centralizada em grandes unidades produtivas não teria sido viável sem a existência de uma fonte de energia mais vigorosa do que as forças de homens e animais, e que fosse independente da disponibilidade da natureza como o caso das fontes eólicas e hidráulicas (LANDES, 1994, p. 49 e 101).

O grande diferencial das máquinas a vapor era o fato de consumir combustível mineral, com fornecimento aparentemente ilimitado. A exploração em larga escala foi possível ainda que as primeiras máquinas a vapor se mostrassem brutalmente ineficazes, transformando em trabalho menos de 1% da energia dos combustíveis, entretanto, o aumento extraordinário da quantidade de energia que passava a estar disponível a partir do seu uso tornava irrelevante essa ineficiência.

A situação se alteraria nas últimas décadas do século XIX, com o esgotamento gradativo das possibilidades tecnológicas das máquinas a vapor de movimento alternado, e com o contínuo aumento da demanda de energia, especialmente de alta

potência em relação ao espaço. O surgimento da turbina a vapor possibilitou um novo avanço tecnológico, tanto em termo de potência quando de economia (LANDES, 1994, p. 285-287).

A eletricidade foi o sistema energético característico desta onda de mudança técnica e de acordo com Landes (1994, p. 290) teve importância fundamental ao combinar duas de suas características quais sejam: a transmissibilidade, ou seja, a capacidade de deslocar energia no espaço sem grandes perdas e a flexibilidade, dada a sua capacidade de conversão em outras formas de energia, tais como calor, luz e movimento, de forma simples e eficiente.

Complementarmente, o estudo de Rosenberg (1982) demonstra que o histórico do desenvolvimento da eletricidade traduz não apenas uma busca pela redução dos custos por parte das indústrias, mas de uma forma de energia dotada de certas características que a tornassem economicamente viáveis. Haja vista, a eletricidade poderia oferecer melhores condições para o controle e manipulação do calor ou da energia mecânica que outros combustíveis anteriormente utilizados.

As vantagens proporcionadas pela eletricidade podem ser percebidas pela rapidez com que esta forma se tornou dominante na indústria. Na medida em que as máquinas a vapor, ineficientes abaixo de um determinado tamanho, a energia “fracionada” envolveu grandes economias de energia e de capital, proporcionando um ajuste preciso no suprimento de energia para fins específicos. Nos dias atuais, um fator adicional tem sido o surgimento de tecnologias relativamente “limpas” movidas à eletricidade, que substituem tecnologias não-elétricas relativamente sujas (ROSENBERG, 1982, p. 99-101).

Desse momento em diante, o acesso a energia passou a estar relacionado a bem-estar e desenvolvimento econômico e social, dada a grande diversidade de serviços surgidos a partir da propagação da eletricidade, como a iluminação, climatização de espaços, locomoção de pessoas e mercadorias.

Nesse contexto, o surgimento dos motores de combustão interna foi permitido pelo desenvolvimento de uma técnica que possibilitava uma explosão direcionada que impulsiona um objeto, geralmente um pistão, por meio da rápida expansão dos gases num espaço restrito, como um cilindro. Conforme apresentado por Landes (1994, p. 288-289), a aplicação mais importante desse mecanismo ocorreu nos motores, fornecendo aos industriais importantes vantagens em relação ao vapor: mais eficiência no trabalho, que passou a ter ritmo intermitente ou abaixo da carga total, além do sistema de combustão ser mais limpo e a natureza do combustível facilitar a automatização do abastecimento, reduzindo custos substanciais de mão-de-obra.

No processo de desenvolvimento tecnológico, diversas formas de combustíveis foram testadas como força motriz do sistema de combustão interna. No caso do gás, a principal deficiência era a sua mobilidade, devido à necessidade que o motor ficasse preso por cabos de alimentação ou a um forno que servisse de fonte de abastecimento. A solução foi encontrada nos combustíveis líquidos, como o petróleo e seus derivados destilados, ainda que por volta de 1900, seu preço se situasse entre quatro e doze vezes o do carvão mineral na Inglaterra. Com a abertura de novas fontes de abastecimento e o aperfeiçoamento dos métodos de refino e técnicas de distribuição, os preços dos produtos de petróleo caíram rapidamente (LANDES, 1994, p. 289).

No contexto das contribuições de cada sistema energético nos paradigmas, é possível perceber duas questões principais, a estabilidade da base de recursos naturais necessários ao desenvolvimento industrial e o aumento contínuo do consumo de energia. Ainda que esforços estimulassem o desenvolvimento de novas fontes de energia como a hidroeletricidade, o petróleo, a gasolina e o gás, a manutenção da primazia do carvão teve destaque, seja diretamente por meio de máquinas a vapor, ou indiretamente por meio de geradores elétricos (LANDES, 1994, p. 298-299).

Cabe ressaltar que os sistemas energéticos até aqui tratados são resultados de processos de inovação e difusão, em busca de um *design dominante*, tendo em vista que no início existe um grande número de alternativas que passam por diversas etapas de seleção e convergência em que umas são escolhidas em detrimento de outras.

Um caso típico de seleção e convergência para um *design dominante* é o motor a combustão interna, que no início do século XX concorria com o motor a vapor e o motor elétrico. As inovações básicas ocorrem quase que simultaneamente e não havia qualquer evidência que um seria preferido em relação aos outros (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 140).

Segundo Klein (1977, apud FREEMAN; SOETE, 1997, p. 140) em 1890 os veículos a vapor e eletricidade representavam três quartos dos quatro mil automóveis produzidos por 57 firmas americanas, e por volta 1917, dos 3,5 milhões de automóveis produzidos nos EUA menos de 50 mil eram veículos elétricos enquanto os veículos a vapor desapareciam<sup>50</sup>.

Ainda que argumentos favoráveis ao motor de combustão interna demonstrem sua superioridade em relação aos demais, Volti (1990, apud FREEMAN; SOETE, 1997, p. 140) descreve desvantagens deste motor como a transmissão por engrenagem corredeira e a manivela de partida que poderia acidentiar seus usuários<sup>51</sup>. Em contra partida, os veículos elétricos tinham uma partida e um funcionamento mais simplificado, além de serem silenciosos, confiáveis e inodoros.

Nenhuma destas vantagens foi capaz de evitar o domínio por completo do motor à combustão interna no mercado automobilístico durante os anos 1920, deslocando os demais para nichos de mercados especializados ou para museus. Obviamente esta não era uma questão meramente técnica, postos de reabastecimento, facilidades de reparo e manutenção poderiam ter sido organizadas de forma diferente, observando as estratégias dos fabricantes e as políticas de utilidade pública dos órgãos reguladores. Na atualidade, a existência de 500 milhões de automóveis a combustão interna, é fato gerador de um aprisionamento (*lock-in*) a esses motores, impedindo de certa maneira, qualquer alteração para um sistema alternativo um empreendimento verdadeiramente maciço (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 141).

---

<sup>50</sup> De acordo com Volti (1990, p. 43 apud FREEMAN; SOETE, 1997, p. 140) dentre as principais produtoras de veículos a vapor a Stanley Motor Carriage Company, no mesmo ano havia produzido cerca de 730 veículos, quantidade menor do que a Ford produzia em um só dia no período da manhã.

<sup>51</sup> Com a invenção do motor de arranque elétrico por Kettering em 1912 este problema foi resolvido.

Esse aprisionamento não deixa de ser um dos motivos que, ao longo da história faz com que sempre uma forma de energia dominante orienta as trajetórias do setor energético. O intenso processo inovativo, ocorrido nesta quarta onda de mudança técnica, a partir da produção em massa, levou a difusão de um sistema energético baseado no petróleo e na manutenção da dependência de outros combustíveis fósseis como o carvão.

O impacto da dependência da energia dominante é tão significativo que apenas pequenas perturbações afetam a economia como um todo. Esse foi exatamente o resultado da crise energética do petróleo na década de 1970. Iniciou-se com a redução acentuada das reservas mundiais de petróleo, resultando em duas crises de fornecimento, uma em 1973, na qual o preço do barril salta de US\$ 3 para US\$ 12 e a outra em 1979, quando o preço do barril atingiu US\$ 32. Em resposta a essa adversidade, nações adotaram estratégias diferenciadas para superar as crises, que conforme Costa e Prates (2005, p. 9) podem ser listadas abaixo.

- a) Mudança do petróleo por outras fontes de energia, especialmente a nuclear nos países industrializados e, no caso do Brasil, a energia hidráulica e o álcool;
- b) “Desmaterialização” das economias, com intuito de reduzir o seu conteúdo material (e energético), fez com que o setor de serviços assumisse a posição de vetor de crescimento nas economias mais adiantadas;
- c) Mudança nos comportamentos e hábitos dos consumidores;
- d) Deslocamento de indústrias intensivas em energia para regiões abundantes em fontes energéticas, principalmente em economias menos desenvolvidas;
- e) Progresso técnico do lado da demanda, através da melhoria da eficiência energética de aparelhos e equipamentos;
- f) Inovação do lado da oferta de energia, permitindo, aumentar as reservas, como por exemplo, no caso do petróleo, por meio da possibilidade de exploração e produção em mar (*offshore*) e em águas profundas.

Este cenário de crise revelou a grande dependência mundial de fontes fósseis de energia, estimulando, em diversas nações, a busca por alternativas energéticas na

tentativa de incorporar o fator ambiental, elemento que passou a compor as agendas das políticas energéticas. O efetivo ingresso do fator ambiental nas políticas energéticas foi possibilitado por meio das fontes renováveis de energia, que poderiam ser amplamente utilizadas para gerar eletricidade, calor ou para produzir combustíveis líquidos passíveis de utilização pelo setor de transportes. A opção por “fontes limpas” é fator essencial para o portfólio de fornecimento de energia atual, contribuindo para a segurança do abastecimento mundial de combustíveis, reduzindo a dependência dos recursos fósseis e contribuindo para o oferecimento de oportunidades de mitigação de gases de efeito estufa (OECD-IEA, 2007, p. 3).

Do ponto de vista econômico, o esgotamento dos recursos fósseis, ao longo do tempo, implicará em custos crescentes de produção, sendo cada vez mais necessárias inovações tecnológicas e novos métodos de produção de energia com vistas ao atendimento da demanda crescente. Entretanto, as inovações no setor de petróleo estão permanentemente influenciando o alongamento da permanência de sua posição dominante no mercado, o que não significa afirmar que este setor continuará a ocupar essa posição eternamente. Segundo Costa e Prates (2005, p. 10), as descobertas de novos poços de petróleo vêm declinando ao longo do tempo, conforme alerta de especialistas da *Aspo (Association for the Study of Peak Oil and Gas)*. A última grande descoberta no Oriente Médio ocorreu na década de 1970, fazendo com que grandes empresas revisem constantemente suas estimativas de reservas, além de gerar uma grande controvérsia sobre a contabilização das reservas na Arábia Saudita.

### **2.1.2 Os desafios da transição ao baixo carbono**

Os riscos de abastecimento e os limites ambientais do crescimento baseado em fontes não renováveis de energia suscitam a urgência de se encontrar, a médio e em longo prazo, formas que substituam o padrão energético mundial. No entanto, mesmo que seja muito clara a importância desse movimento, não é trivial a substituição da matriz energética dominante. Dentre as vantagens competitivas da utilização do petróleo estão o alto conteúdo energético, o aparato tecnológico construído para a extração, distribuição, transporte e armazenamento, que fizeram do petróleo uma fonte muito

flexível, além das inovações que transformaram essa fonte em diversos combustíveis para múltiplas aplicações. Destarte, o investimento já realizado no setor petrolífero pode obstaculizar o surgimento de novas hegemonias nos setores de desenvolvimento, produção e distribuição de fontes de energia que hoje são consideradas alternativas.

Mesmo que a tecnologias maduras para a produção de energia renovável ainda não sejam capazes de substituir o petróleo em todas as suas possibilidades de aplicações, é fato que elas substituirão, gradativamente, fontes fósseis de energia, mitigando os riscos de abastecimento na busca por reduzir os impactos perversos do crescimento econômico sobre o meio ambiente.

A prospecção de um cenário de movimento rumo ao baixo carbono é constatado, inclusive, pelas tendências mais pessimistas do *World Energy Outlook*, que projetam um futuro em que os governos não assumam mudanças ativas nas políticas energéticas. A partir da construção dos 450 cenários, conclui-se que, apesar das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas a consumo de energia continue a ser o principal responsável pelo efeito de estufa global, tende a ser declinante a partir de meados da próxima década, retornando aos níveis pré-industriais, como pode ser ilustrado na figura abaixo:

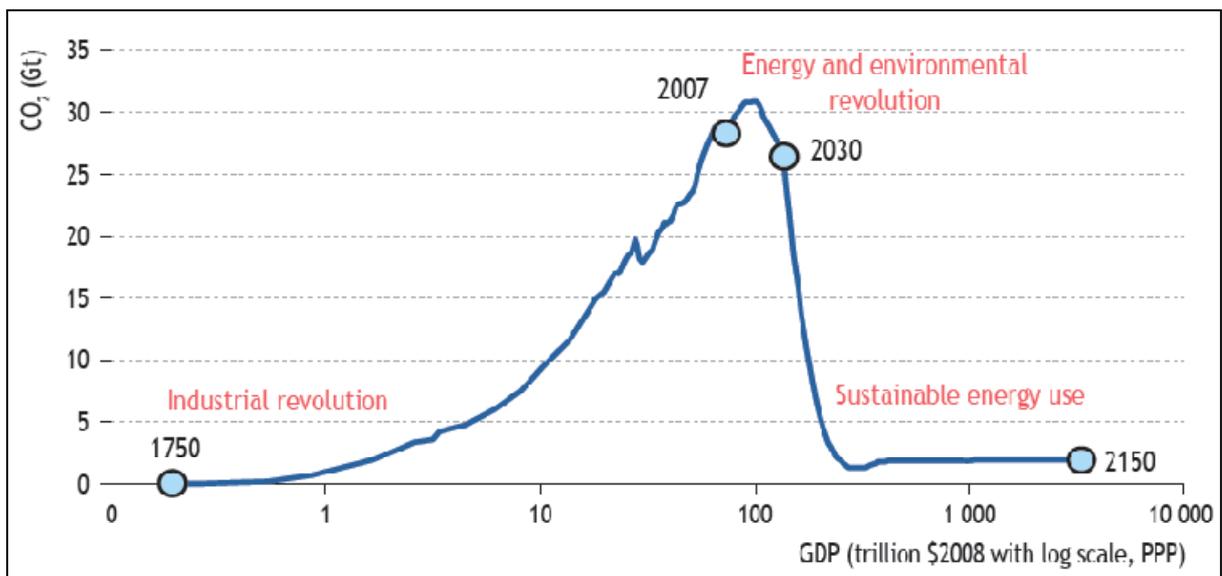


Figura 4 – Histórico da relação crescimento econômico e emissões de CO<sub>2</sub>

Fonte: IEA, 2009, p. 172.

Nos cenários de curto e médio prazo, a velocidade do processo de transição ao baixo carbono continuará a ser determinada pelos planos que começam a ser estabelecidas por países que detêm alta capacitação científico-tecnológica para enfrentar os desafios impostos pela escalada das emissões.

Um exemplo desse argumento pode ser exemplificado pelo Plano de Baixo Carbono do Reino Unido<sup>52</sup>, anterior a COP-15 e que tem como meta o corte de 80% das emissões até 2050, e será operacionalizado por meio de orçamentos quinquenais de carbono até 2022. Uma característica do Plano é responder aos desafios das mudanças climáticas, transformando a nação em um lugar mais limpo, mas sem deixar de suscitar oportunidades como a geração de “empregos verdes”, reformas de casas que gerarem sua própria energia e carros que funcionem com baixo nível de emissão de carbono<sup>53</sup>.

Para que essa transformação do sistema de energia possa ocorrer, os novos sistemas tecnológicos precisam emergir em torno de uma gama de novas tecnologias energéticas. Com este objetivo Jacobsson e Bergek (2004, p. 829-830) afirmam que o alinhamento institucional está no cerne do processo de transformação. Inicialmente, o quadro institucional deve começar a ser alinhado com a nova tecnologia e o desafio para os políticos é contribuir para um processo de alinhamento institucional, mesmo que interesses de grupos dificultem este processo.

Tal alinhamento é multifacetado e irá apontar para três tipos de ajustes institucionais, que são necessários para um novo sistema a emergir que são: a variedade de “criação de conhecimento”, formação de mercado e, associado com isso, ganhar legitimidade para a nova tecnologia. Para este desafio Jacobsson e Bergek (2004, p. 830) citam o conjunto de tecnologias de *thin-films* para produção de células FV, que dada a prevalência de incerteza tecnológica, os políticos tendem a evitar pensar em termos ótimos. O princípio orientador da política deve, em vez disso, contribuir para a geração

---

<sup>52</sup> Detalhes do “*The UK Low Carbon Transition Plan*” estão disponíveis em <<http://www.decc.gov.uk/>>.

<sup>53</sup> Podemos destacar iniciativas em curso como a taxa de carbono francesa, aprovadas em setembro de 2009, que tinha como meta o corte de três quartos de suas emissões, e que em Março de 2010 foi abandonada por comprometer a competitividade das empresas do País. Outro destaque é a Reforma Política Energética Norte-americana, em fase de aprovação pelo Senado desde outubro de 2009.

de um conjunto diversificado de opções tecnológicas por estimular a experimentação e a “criação de conhecimentos” ligados a diferentes abordagens de design.

Para fazer frente ao desafio de criar um modelo de governança de longo prazo para essa transição sócio-técnica, o estudo de Meadowcroft (2009) discute a contribuição da gestão de “transição” para esses processos, destacando que sem o papel fundamental do governo as transformações de longo prazo dos sistemas de energia se mostrarão processos conflituosos e desarticulados.

Conceitualmente, a “gestão da transição” é entendida como o desafio de orientar uma mudança de longo prazo em grandes sistemas sócio-técnicos. A “transição” pode ser interpretada como processos estruturais de mudança de grandes subsistemas sociais, e a “gestão” refere-se a um esforço consciente para orientar essas transições ao longo de caminhos desejáveis. Complementarmente, podemos citar algumas características promissoras da perspectiva da governança para o desenvolvimento sustentável e gestão de transição (MEADOWCROFT, 2009, p. 123):

- a) Tornar o futuro mais claramente manifestado na forma de decisões atuais, explorando trajetórias alternativas e abrindo caminhos para a inovação do sistema;
- b) Transformar as práticas insustentáveis estabelecidas em crítica da sociedade;
- c) Estabelecer ligações entre o social e as inovações tecnológicas, porque ambos os tipos de alterações são necessárias para que a sociedade esteja pronta a avançar para um caminho mais sustentável;
- d) Incentivar a diversidade de inovações (“variação”) e a competição entre diferentes abordagens (“seleção”) para satisfazer as necessidades da sociedade.

Um relato da experiência nestes processos é fornecido por Kemp e Rotmans (2009), após a participação no quarto Plano Nacional de Política Ambiental da Holanda no ano de 2000. O objetivo dos autores é aprofundar o conceito de transição, tanto no sentido geral quanto especificamente, em transições para um sistema de baixo fornecimento de energia, explorar as possibilidades para a gestão de transição em termos de gestão

com múltiplos atores, além de avançar em recomendações para futuras pesquisas sobre a transição energética.

Dentre as contribuições dos autores, destaca-se a criação da noção de gestão da transição, que se tornou um conceito-chave para o Ministério de Assuntos Econômicos. Além de demonstrarem fatores críticos para o sucesso do projeto o formato do debate que possibilite o aprendizado mútuo, o desenvolvimento de uma linguagem comum e principalmente a manutenção de um ambiente em que pesquisadores reconhecem os limites do seu conhecimento e políticos são capazes de sair do seu *mental framework*, possibilitado pelo formato de debate aberto (KEMP; ROTMANS 2009, 320-321).

A experiência holandesa na criação de um modelo de gestão da transição para se alcançar um sistema energético sustentável para 2030, também foi analisada por Kern e Smith (2008). Os referidos autores, apesar de reconhecerem as importantes conquistas alcançadas, criticam o modelo alegando a existência de negligências das políticas de mudança estrutural. Os autores afirmam que os debates sobre a transição foram excessivamente otimistas sobre o papel dos governos, se considerar que as inovações nestes sistemas são politicamente difíceis.

De modo geral a eficácia da política de abordagens evolucionárias nos casos em que estão envolvidas alterações radicais ainda não está comprovada, entretanto espera-se que a perspectiva evolutiva ganhe importância na análise política, quando a atenção se desloca para alterações no sistema como forma de trabalhar em prol do desenvolvimento sustentável (NILL; KEMP, 2009).

Mesmo que a análise desenvolvida não tenha sido capaz de abordar todo o conteúdo relacionado a este arranjo de governança de longo prazo, é possível concluir que significativos avanços são necessários, pois constituem esforços de importância estratégica para viabilização de economias baseadas em baixas emissões de carbono. Para o próximo item, busca-se o entendimento o papel das políticas públicas na formas de mecanismos extra-mercado capazes de direcionar o avanço econômico no sentido de difundir tecnologias benéficas ao meio ambiente, como a energia FV.

## **2.2 Políticas públicas para difusão de tecnologias ambientalmente favoráveis**

No desafio das políticas públicas para difusão de tecnologias, enquanto economistas têm concentrado sua atenção nos setores de mercado, pesquisas sobre ambiente de seleção em setores extra-mercado foram realizadas por antropólogos, sociólogos e cientistas políticos. Uma prática recorrente nos esforços de teorização dos ambientes de seleção de mercado é a separação relativamente clara entre firmas de um lado e consumidores e reguladores do outro, e a avaliação dos produtos por parte dos consumidores é o critério que deveria ditar a alocação de recursos na economia. Neste sistema, como as firmas concorrem pelas compras dos consumidores a viabilidade de uma inovação deveria depender da avaliação que os consumidores fazem dela (NELSON; WINTER, 1982, p. 268).

Para efeitos destas políticas são dois os temas principais tratados pelo arcabouço evolucionista, os processos que determinam a variedade de inovações introduzidas na economia e a seleção enquanto processo que altera a importância econômica relativa das alternativas concorrentes. Essas questões são fundamentalmente dinâmicas e estão relacionadas com a natureza da concorrência e com o processo endógeno de mudança. A relação entre variedade de inovações e sua seleção é dada por duas vias e, na medida em que a seleção é dada através de processos de *feedback* positivos e negativos significa que o desenvolvimento desta variedade é moldada pelo processo de seleção (METCALFE, 1994, p. 933).

Uma parte significativa das soluções tecnologicamente sustentáveis consiste no provimento de mudanças, seja pela rápida difusão das tecnologias existentes, ou por meio de atividades inovadoras que desenvolvam novas tecnologias. Nesse processo de seleção e difusão tecnológica, se for desconsiderado o papel preponderante do governo, será o ambiente do mercado o responsável pela determinação das inovações que serão propensas a difusão. O mecanismo de seleção considera, em grande parte, o esforço inovativo das firmas, mas no contexto de incerteza do sistema, não existe garantia absoluta que a técnica mais ambientalmente eficiente ou a melhor tecnologia seja selecionada e difundida.

No ambiente de mercado, o sucesso de uma inovação de produto ou processo para uma firma está estreitamente relacionado com a lucratividade que a mesma obterá com o seu lançamento no mercado, determinado pelas preferências dos consumidores e por mecanismos que regulam o processo de seleção. Para a difusão de tecnologias ambientalmente sustentáveis não é suficiente entender apenas o funcionamento desses mecanismos, haja vista que tecnologias que contribuem para sustentabilidade, nem sempre são lucrativas para as empresa, o que dificulta ou impede sua seleção e difusão no mercado.

Nos ambientes de mercado a difusão de inovações pode ser vista como um processo de aprendizado tecnológico, que ocorre através de investimentos em P&D e dos processos informais de acúmulo de conhecimento tecnológico dentro das firmas, tais como os *learning-by-doing*, *learning-by-using* e o *learning-by-interacting* (SILVERBERG; DOSI; ORSENIGO, 1988).

Já nos ambientes extra-mercado, uma característica marcante é o fato da separação entre os interesses da firma e do consumidor não ser tão rigidamente definida. Na maioria dos setores extra-mercados a firma tem um razoável poder discricionário com relação ao que deve fornecer e o cliente possui escasso poder para premiar ou punir seu desempenho. Por essa razão não se pode supor que as firmas de um setor extra-mercado sejam motivadas apenas pelo lucro monetário (NELSON; WINTER, 1982, p. 268 e 269).

A construção deste quadro político precede a concepção de uma ampla gama de leis, políticas e instituições públicas, que são partes importantes do ambiente que molda as atividades do setor privado, tendo em vista que uma parcela significativa da atividade econômica é conduzida por instituições públicas e não privadas. Como exemplo dessa condução, podemos citar: leis e políticas que definem o que pode ser patenteável ou não; os acordos de licenciamento que influenciam vantagens relativas da inovação e da imitação; os sistemas educacionais públicos e principalmente os programas de apoio a pesquisa e desenvolvimento governamentais que, desde a Segunda Guerra Mundial,

garantem aproximadamente metade dos fundos totais destas atividades (NELSON; WINTER, 1984, p. 371).

Nesta condução é cada vez mais necessário dimensionar o progresso da ciência e tecnologia para o entendimento do processo inovativo, e suas implicações na economia. Nesse contexto os economistas são os que menos podem ignorar as inovações como uma condição essencial para o progresso econômico e um elemento crítico na luta concorrencial das empresas e das nações. Elas são fundamentais não apenas para sustentar um taxa de crescimento econômico, mas também para os que desejam mudar a direção do avanço econômico na direção de uma melhor qualidade de vida, neste sentido destaca-se seu papel fundamental na conservação de recursos naturais de longo prazo e na melhoria do meio ambiente (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 2).

Os autores Freeman e Soete (1997, p. 413), destacam três motivações pelas quais o enfoque nas questões ambientais impõe desafios políticos específicos para mudança tecnológica pelas inovações. Em primeiro lugar, o desenvolvimento sustentável precisa com urgência adquirir uma maior prioridade nas agendas dos governos, pois representa tipicamente um objetivo político de longo prazo, e esse desafio requer ampla gama de inovações e a gradativa mudança das instituições e das tecnologias de produção e consumo existentes<sup>54</sup>. Uma segunda motivação que exige particular atenção é sua complexidade intrínseca, tendo em vista que as políticas para o desenvolvimento sustentável exigem políticas diversificadas, o envolvimento de diversos agentes econômicos além de mudanças nas suas instituições. Essa motivação não deixa de ser um teste útil da capacidade de enfoque sistêmico na orientação do desenvolvimento de políticas. Uma última motivação reside na íntima relação entre objetivos públicos e privados, pois por mais que os objetivos da sustentabilidade ambiental sejam

---

<sup>54</sup> Estudos de Jansen e Vergragt (1992, apud Freeman e Soete, 1997, p. 413), estimam que essas mudanças requerem, mesmo com esforços sistemáticos, um prazo de talvez trinta e cinco anos para sua realização. Trata-se de um prazo muito maior que diversos desafios da Comunidade Européia em política tecnológica, como por exemplo, a redução das taxas de desemprego e qualificação da força de trabalho.

essencialmente públicos, não serão alcançados sem garantir ao setor privado a viabilidade dessas mudanças e sua capacidade de se ajustar a elas.

No direcionamento específico da mudança técnica, as políticas tecnológicas e de inovação desempenham um papel fundamental para se alcançar um modelo de desenvolvimento sustentável e serão analisadas a seguir. De maneira geral, o objetivo dessas políticas consiste em substituir métodos de produção e padrões de consumo não-sustentáveis, além de prover meios para difusão de uma ampla gama de tecnologias alternativas e mais benéficas ao meio ambiente (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 413).

O uso de políticas de ciência e tecnologia para se alcançar objetivos ambientais constitui um novo campo para as políticas tecnológicas, que requer um retorno a ênfase aos objetivos públicos dos anos 1950 e 1960, a serem alcançados por meio de *mission-oriented projects*. No entanto, Freeman (1996, p. 36-37) mostra que existem diferenças fundamentais entre os “projetos orientados por uma missão” (tradução nossa) e novos projetos de apoio ao desenvolvimento ambientalmente sustentável, que são apresentadas de forma esquemática no Quadro 7.

Quadro 7 – Características dos antigos e dos novos projetos orientados a uma missão

<b>Antigo:</b> Defesa, nuclear e aeroespacial	<b>Novo:</b> Tecnologias ambientais
A missão é definida em termos do número e tipo de resultados técnicos com pouca preocupação com sua viabilidade econômica	A missão é definida em termos de sua viabilidade econômica para solução técnica de problemas ambientais específicos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os objetivos e a direção do desenvolvimento tecnológico são definidos antecipadamente por um pequeno grupo de especialistas.</li> <li>• Controles centralizados dentro de uma administração governamental.</li> <li>• Difusão dos resultados fora do núcleo de participantes é de menor importância ou ativamente desencorajada.</li> <li>• Limitado a um pequeno grupo de firmas participantes devido a ênfase em um pequeno número de tecnologias radicais.</li> <li>• Projetos auto-suficientes com pequena necessidade de políticas complementares e escassa atenção prestada à coerência.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A direção da mudança técnica é influenciada por uma ampla gama de agentes, incluindo governos, firmas privadas e grupos de consumidores.</li> <li>• Controle descentralizado com um grande número de agentes envolvidos.</li> <li>• Difusão dos resultados constitui um objetivo central e é ativamente encorajado.</li> <li>• Ênfase no desenvolvimento de inovações tanto radicais como incrementais, a fim de permitir a participação de um grande número de firmas.</li> <li>• Políticas complementares são vitais para o sucesso e muita atenção é prestada à coerência com relação a outros objetivos.</li> </ul>

Fonte: Freeman (1996, p. 37), tradução nossa.

O grande desafio colocado para as políticas ambientais é promover tecnologias sustentáveis no contexto de uma economia de mercado que seleciona produtos e processos com critérios, a exemplo da lucratividade, que por sua vez é influenciada pela demanda, e não com base em critérios ambientais (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 415). O resultado na prática foi o impulso da industrialização direcionado para tecnologias baseadas em combustíveis fósseis.

Para funcionar como um mecanismo extra-mercado, o papel principal das políticas governamentais é estimular o setor privado a busca por inovações e tecnologias em direções benéficas ao meio ambiente, frente à existência de fortes trajetórias concorrentes para produções não-sustentáveis. Os objetivos destas políticas, segundo Freeman e Soete (1997, p. 416), é iniciar um processo auto-reforçador no qual buscas adicionais por novas soluções técnicas sigam a mesma via técnica, um exemplo são as próprias células FV que segundo os autores:

For example, experience gained from generating electricity from photovoltaic cells in few situations where this technology is economically competitive should lead to learn effects that gradually improve the cost effectiveness of photovoltaic cells and increase their competitiveness. Increasing competitiveness should then attract additional investment in this technology, leading to further technical improvements and cost reductions and widening, of the number of economically feasible applications (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 416, grifo nosso).

Os trabalhos de Freeman e Soete (1997, p. 416) indicam ainda a existência de três principais políticas para guiar firmas privadas, no sentido de investirem no desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis: regulação direta, instrumentos econômicos, intervenção e políticas para alterar os vínculos sociais das mudanças técnicas, que serão detalhados a seguir.

- a) Regulação direta: Realizada por meio do estabelecimento de padrões da qualidade do ar, da água e do solo, ou com o estabelecimento de limitações nas condições de uso de um produto. Meio mais utilizado na redução da poluição, tem sido extensamente criticado como meio menos eficiente que instrumentos econômicos para produzir inovações;

- b) Instrumentos econômicos: São políticas que estimam os custos de externalidades da poluição e vinculam estes custos aos insumos ou aos produtos do processo produtivo. Incluem permissões de emissões comercializáveis, a taxação de emissões de produtos, podendo em alguns casos, conceder subsídios;
- c) Compras governamentais: Apóiam a pesquisa e o desenvolvimento por meio de subsídios de tecnologias benéficas ao meio ambiente. As compras diretas são as mais adequadas para o desenvolvimento de novas tecnologias (energia, transporte e descarte de resíduos) com subsídios de créditos fiscais ou projetos de pesquisa cooperativos entre empresas e institutos públicos de pesquisa, para os casos em que o conhecimento não está codificado ou disponível publicamente;
- d) Vínculos Sociais: Consiste numa ampla gama de influências que delimitam os tipos de tecnologias tanto social quanto economicamente viáveis. Podem ser influenciados por programas educacionais ou por uma política de apoio a organização que aumente a pressão interna e externa sobre as firmas para integrar os aspectos ambientais a estratégia geral dos seus negócios.

Além da simples escolha da política para guiar o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis, Freeman e Soete (1997, p. 418) afirmam que os agentes econômicos devem considerar o caráter altamente incerto das mudanças tecnológicas. O desenvolvimento de algumas tecnologias pode ser prejudicial ao meio ambiente em seu estágio inicial, mas benéficas em estágios posteriores, enquanto que outras podem trazer algum benefício no início e depois se mostrarem altamente perigosas<sup>55</sup>.

Outro desafio destas políticas é evitar que o aprisionamento, *lock-in*, a tecnologias disponíveis induza a proliferação de tecnologias *end-of-pipe* que por definição apenas transferem a poluição de um lugar para outro, ao invés de empregar processos mais

---

<sup>55</sup> Como por exemplo, os clorofluorcarbonos (CFCs) que podem refrigerar os alimentos evitando o desperdício, mas que também podem danificar a camada de ozônio (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 418).

limpos<sup>56</sup>. O grande benefício para as empresas ao investir em tecnologias *end-of-pipe* está no retorno de curto prazo que elas proporcionam, além da possibilidade de aplicação em uma ampla gama de tecnologias de produção, propiciando um maior mercado para esse tipo de tecnologia se comparada a inovações em processos mais limpos. Dessa forma, políticas para inovações ambientalmente sustentáveis podem, involuntariamente, encorajar inovações em soluções técnicas inferiores, impedindo o desenvolvimento, no longo prazo, de tecnologias de processos mais limpos (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 418).

Uma solução, proposta por Freeman e Soete (1997, p. 418) para solucionar esse impasse, consiste em encorajar inovações que reduzam a quantidade total de insumos necessários à fabricação de uma unidade de produto. Esta solução resultaria em economias para a firma, pois reduziria os custos totais para um dado nível de produção, além de, na maioria dos casos, resultarem em tecnologias de produção mais limpa.

De maneira geral, o papel das políticas de inovação para a sustentabilidade do desenvolvimento é o de encorajar a difusão de uma ampla gama de tecnologias benéficas ao meio ambiente, seja por meio de políticas de incentivos ou por meio da difusão de conhecimentos acerca das possibilidades de aplicação. Para aumentar o número de indivíduos que possuem conhecimento sobre essas tecnologias, são necessários programas específicos como os de transferência de tecnologia, que podem dar nova dimensão a exposição a potenciais usuários. O processo de difusão de informações e conhecimentos acerca de inovações para tecnologias limpas é crucial para o setor público, principal responsável pela aplicação de políticas de longo prazo que tornarão essas tecnologias disponíveis para utilização no setor privado. Para tanto, o sucesso das políticas de compras do governo está em assegurar que essa ampla gama de aplicações potenciais inclua o maior número possível de empresas capazes de se beneficiar delas (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 419-420).

---

<sup>56</sup> Um exemplo é a tecnologia de conversores catalíticos que reduzem os gases nocivos emitidos pelos motores de combustão interna, ao invés de desenvolver algum tipo alternativo de motor que não produza esses gases (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 418).

Nesses projetos, segundo Freeman e Soete (1997, p. 420) é necessária a exploração tanto de tecnologias tradicionais quanto novas, haja vista a necessidade de melhorias adicionais em tecnologias existentes e radicais descobertas tecnológicas.

Both radical breakthrough technologies and incremental improvements to existing technologies are needed. An example of future breakthrough innovation is solar or another renewable energy technology that could acquire a central role in environmentally sustainable economy. An example of an incremental innovation with environmentally beneficial effects is a technical adaptation to jet aircraft engines to increase fuel efficiency and reduce Nox emissions (FREEMAN; SOETE, 1997, p. 421).

A exploração de tecnologias novas e tradicionais de Freeman e Soete (1997, p. 37-38) enquadra as políticas governamentais em duas áreas principais que orientam investimentos na direção da busca por tecnologias ambientalmente sustentáveis, quais sejam:

Quadro 8 – Principais opções de políticas de apoio para o desenvolvimento sustentável

<p><b>1. Políticas podem ser usadas para orientar inovações, particularmente na direção de processos tecnológicos limpos e a taxas mais baixas de insumo/produto.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulamentação direta de padrões de qualidade do ar, água, solo e dos produtos.</li> <li>• Instrumentos financeiros, tais como taxaço das emissões e impostos sobre produtos ou licenças de emissões comercializáveis.</li> <li>• Compras governamentais por meio de apoio direto a P&amp;D ou através de subsídios.</li> <li>• Políticas para alterar a estrutura social, incluindo a persuasão social, fatores de demanda e avaliação construtiva de tecnologias.</li> </ul>
<p><b>2. Políticas para influenciar o processo de inovação e assegurar a difusão de novos conhecimentos.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sempre que possível, usar princípios incrementalistas baseados em curtos tempos de desenvolvimento e projetos de pequenas dimensões para permitir que um número organizações e empresas participem de cooperações em projetos de P&amp;D.</li> <li>• Controle descentralizado de projetos de inovação utilizando uma abordagem em rede para interligar institutos de pesquisa líderes, empresas privadas e outras organizações.</li> <li>• Projetos de demonstração e de programas de transferência de tecnologia.</li> </ul>

**Fonte:** Freeman, (1996, p. 37), tradução nossa.

Complementar à análise do desenho das políticas públicas para orientar inovações e assegurar a difusão de novos conhecimentos, partimos para o entendimento de como países utilizam mecanismos institucionais para a difusão da energia FV.

### **2.2.1 Mecanismos institucionais e estratégias de desenvolvimento de FV**

Os mecanismos institucionais desempenham um papel cada vez mais importante no sentido de condicionar, determinar, direcionar e seleccionar inovações tecnológicas. Esses esforços resultam em efeitos de aprendizado e em inovações de processo que proporcionam a queda do custo de produção da energia FV, além de aperfeiçoamentos adicionais que garantam a sua difusão através de ampla gama de possibilidades de aplicações tecnológicas.

Contudo, a ampla utilização de mecanismos institucionais não é defendida por todos, e um exemplo é o trabalho de Rivers e Jaccard (2006), que concluem que em vez de forçar a difusão através de instrumentos de regulamentação, o governo deve procurar corrigir externalidades utilizando instrumentos baseados no mercado. Suas análises afirmam que em muitos casos, os instrumentos de regulamentação são mais caros do que os instrumentos baseados no mercado, pelo fato do governo determinar as políticas baseando-se em um conjunto mais amplo de critérios, incluindo a aceitabilidade política. Por esta razão, os instrumentos de regulamentação além de ser mais caros se comparados aos instrumentos baseados no mercado, podem ter custos ainda maiores quando avaliados utilizando esses atributos.

Além de uma conclusão definitiva sobre essa questão, esses mecanismos podem ser classificados de acordo com diferentes critérios, por exemplo, se eles interferem na demanda ou na produção ou se subsidiam aumento na capacidade ou na geração. Segundo Costa (2006, p. 14) uma primeira distinção que se faz é entre os mecanismos diretos e indiretos. A grande diferença é que enquanto que os mecanismos diretos têm como objetivo promover as fontes de energia renovável, como a FV; os indiretos são voltados para promover políticas “fora” do setor de energia renovável, mas que acabam tendo um impacto positivo na promoção de renováveis, como por exemplo, taxas sobre o uso de combustíveis fósseis, taxas sobre emissões das indústrias, para incentivar o uso eficiente da energia ou para reduzir as emissões de gases poluentes e de efeito estufa.

Nos últimos anos as decisões políticas começaram a compreender a urgência e a necessidade de mecanismos de apoio à energia renovável, em especial a FV, e cada vez mais ações estão sendo colocadas em prática. Como resultado, um amplo espectro de regimes de apoio, ao redor do mundo, têm sido implementados. Um esboço desta ampla gama de mecanismos de apoio a energia FV desenvolvida nos países do EIA/PVPS é descrito no Quadro 9.

Quadro 9 – Formas de mecanismos institucionais para suporte à energia fotovoltaica

1. Feed-in tariff	Estabelecimento de um preço por parte dos governos, para que as concessionárias de distribuição de energia elétrica paguem por cada kWh produzido através tecnologias baseadas em fontes renováveis.
2. Subsídio de capital	Subsídios financeiros diretos destinados a combater a barreira de custo, tanto para equipamentos específicos ou custos totais de instalações de sistemas fotovoltaicos.
3. Esquemas e eletricidade verde	Permite que clientes comprem eletricidade verde baseada em energia renovável a partir da companhia de eletricidade, geralmente, a um preço diferenciado
4. Regimes específicos de eletricidade verde-FV	Permite que clientes comprem eletricidade verde baseada em energia fotovoltaica a partir da companhia de eletricidade, geralmente, a um preço diferenciado.
5. Portfólio padrão de renováveis (RPS)	Estabelece que a empresa pública de eletricidade mantenha parte do fornecimento de eletricidade a partir de renováveis.
6. Exigência fotovoltaica em RPS	Estabelece que a empresa pública de eletricidade mantenha parte do fornecimento de eletricidade partir de energia fotovoltaica (muitas vezes chamado de <i>set-aside</i> ).
7. Fundos de investimento para FV	Ofertas de ações em fundos de investimentos privados, acrescido de outros regimes que se concentram na criação de haveres e sucesso do negócio, usando energia FV como um veículo para atingir estes fins.
8. Créditos de imposto de renda	Permita que algumas ou todas as despesas associadas com a instalação do PV seja deduzido de rendimentos tributáveis.
9. Net metering	O proprietário do sistema recebe valor de varejo para qualquer excesso de eletricidade alimentada na rede, registrado por um contador de eletricidade bi-direcional e compensado durante o período de faturamento.
10. Net billing	As tomadas de eletricidade da rede e alimentadores de eletricidade para a rede são controladas separadamente, e a eletricidade que alimenta a rede é avaliada em um determinado preço.
11. Atividades de banco comercial	Inclui atividades como termos de hipoteca de casas, incluindo sistemas de PV e empréstimos verdes preferenciais para a instalação de sistemas fotovoltaicos.
12. Atividades de utilidade elétrica	Inclui os regimes de “energia verde”, permitindo aos clientes comprar a eletricidade verde em várias opções de financiamento com os clientes escolhendo o modelo de aquisição de energia.
13. Exigências de construção sustentável	Inclui requisitos relativos à construção de novos empreendimentos (residenciais e comerciais) e também em alguns casos, em propriedades à venda, onde a energia fotovoltaica pode ser incluída como uma opção para reduzir o impacto energético da construção do edifício ou pode ser encomendado especificamente como uma inclusão no desenvolvimento da construção.

Fonte: IEA (2009, p. 31).

Os países usaram mecanismos institucionais diferenciados para assegurar o impulso nas instalações FV durante as últimas décadas, e sua aplicação depende das especificidades de cada nação, que garantem diferentes níveis de importância entre os mecanismos. No Japão observa-se a predominância do programa de incentivo para o uso residencial desta fonte, na Europa (Alemanha e Espanha), prevalecem os *feed-in tariffs*, na China o sistema de suporte tarifário e nos Estados Unidos as Políticas Regulatórias de Concessionárias.

Quadro 10 – Mecanismos institucionais para suporte a energia FV em países selecionados

	AUS	AUT	CAN	CHE	DNK	DEU	ESP	FRA	GBR	ISR	ITA	JPN	KOR	MEX	MYS	NLD	NOR	PRT	SWE	USA
1	•	•	•	•		•	•	•		•	•		•			•		•		•
2	•	•		•		•		•	•		•	•	•		•				•	•
3	•	•	•	•		•	•		•		•	•								•
4	•	•		•																•
5	•								•										•	•
6																				•
7			•			•	•													•
8			•	•				•	•						•			•		•
9	•	•	•	•	•				•		•	•		•	•					•
10			•	•		•			•	•		•			•					•
11	•					•			•			•				•				•
12	•		•	•	•	•	•		•	•		•								•
13	•		•	•		•	•		•				•					•		•

Fonte: IEA (2009, p. 32).

Pelo Quadro 10, pode ser visto como o *feed-in tariff* tem se transformado no principal mecanismo de promoção do desenvolvimento das tecnologias de geração de energia a partir de fontes renováveis, especialmente a solar FV interligada à rede, seguidos pelos subsídios de capital, destinados a combater a barreiras de custo. No mesmo quadro, um destaque é a grande diversidade de mecanismos que são utilizados pelos Estadunidenses para promoção da energia solar FV.

Os benefícios do *feed-in tariff* em relação aos demais podem ser observados no Relatório “*Supporting Solar Photovoltaic Electricity*” da EPIA, a partir da definição de critérios gerais para avaliar esses regimes de apoio como: segurança para investidores, simplicidade e facilidade de implementação, custo efetividade e a capacidade de

provocar o crescimento de uma variedade de tecnologias. Após avaliação dos critérios acima “[...] *have a look at all countries where support schemes are put in place and ask where it worked out best, and then simply copy*” (EPIA, 2008a, p. 1). Este mesmo relatório faz uma avaliação geral dos diferentes mecanismos com base nos critérios:

Quadro 11 – Avaliação de diferentes mecanismos de apoio para a energia FV

	Segurança do investidor	Simplicidade	Sucesso comprovado	Custo efetividade	Garantia de um mix de tecnologias
<b>Feed-in Tariff</b>	☺☺☺	☺☺☺	☺☺☺	☺☺☺	☺☺☺
<b>Sistemas de quotas</b>	☹☹☹	☹☹☹	☹☹☹	☹☹☹	☹☹☹
<b>Investimentos subsidiados</b>	☺	☺☺	☺	☺	☺
<b>Demanda voluntária</b>	☹	☺☺	☹	☺☺☺	☹☹☹

Fonte: EPIA (2008<sup>a</sup>, p. 1, tradução nossa).

O funcionamento das *feed-in tariffs* é dado através do estabelecimento de um preço, estipulado pelos governos, para que as concessionárias de distribuição de energia elétrica paguem por cada kWh produzido através tecnologias baseadas em fontes renováveis. Na maioria dos casos, o preço pago pela concessionária pela energia injetada na rede é maior do que o preço disponível em um mercado atacadista de energia (RODRÍGUEZ, 2002).

As tarifas do *feed-in* são divididas em fixas ou prêmio, sendo que as fixas garantem o preço mínimo da energia gerada, independente do mercado de eletricidade e os prêmios correspondem a um valor adicional além do preço de mercado. Através deste modelo, países como Alemanha, Espanha e Dinamarca alcançaram sucesso na promoção de seus mercados de energia eólica, tendo em vista que a tarifa é capaz de suportar grandes mercados de energia renovável a um custo que acaba sendo distribuído entre todos os consumidores de eletricidade.

No que se refere aos valores pagos pela energia gerada pelo sistema de tarifa fixa, existem dificuldades de operar ajustes que reflitam mudanças nos custos de produção

das diversas tecnologias, o que pode gerar um mercado não competitivo entre as fontes renováveis e entre os empreendedores, tendo em vista que a remuneração independe do mercado de eletricidade (GREENPEACE, 2007).

O fator de sucesso no estímulo do crescimento do mercado FV é a garantia de uma tarifa por um tempo suficientemente grande, estimulando o usuário final que passa a ter diminuição da incerteza envolvida na operação e retornos sobre o investimento (RODRÍGUEZ, 2002).

As experiências internacionais selecionadas nos mostram que apesar da existência de barreiras financeiras, a adoção de fontes renováveis de energia como a energia FV é plenamente viável desde que se criem programas de incentivo governamentais bem estruturados. Um breve histórico das estratégias dos principais países serão relatadas a seguir.

### **Alemanha<sup>57</sup>**

Mesmo que amplamente questionada pelas concessionárias a *Electricity Feed-In Act* (Lei de Eletricidade *Feed-in*), de 1991 e revista em 1998, inovou ao garantir a compra de energias renováveis pelas concessionárias a partir do estabelecimento de um preço fixo mínimo. Nesse modelo as distribuidoras foram obrigadas a transmitir energia renovável na rede para o consumidor e reduzir a compra de energias geradas por fontes convencionais.

Obviamente, o modelo alemão gerou um encarecimento do preço final da energia, sendo que o acréscimo na tarifa de todos os consumidores é repassado para um fundo utilizado para reembolsar, em forma de tarifa prêmio, os consumidores que tenham instalado os sistemas FV. Dessa forma, o incentivo é pago ao longo de vários anos na forma de um prêmio por kWh, permitindo que os consumidores recuperem os seus investimentos num período de dez a doze anos (SALAMONI; RÜTHER, 2007).

---

<sup>57</sup> Ainda que disponha de céu nublado em média em dois terços do dia, sólidas políticas públicas deram a Alemanha o *status* de maior mercado de instalações fotovoltaicas, passando a ser referência no desenvolvimento de energias renováveis, especialmente a FV (WECK, 2008).

Quadro 12 – Tarifas *feed-in* na Alemanha entre 2004 e 2013 (em centavos de €/kWh)

ANO	PCH (de 0,5 a 5MW)	Biomassa (de 5 a 20 MW)	Eólica (On shore)	Solar FV (de 30 a 100kW)
2004	6,65	8,4	8,7	54
2005	6,65	8,27	8,53	51,3
2006	6,65	8,15	8,36	48,74
2007	6,65	8,03	8,19	46,3
2008	6,65	7,91	8,03	43,99
2009	6,65	7,79	7,87	41,79
2010	6,65	7,67	7,71	39,7
2011	6,65	7,55	7,56	37,72
2012	6,65	7,44	7,41	35,83
2013	6,65	7,33	7,26	34,04

**Fonte:** GREENPEACE, 2007. "Mindestvergütungssätze nach dem neuen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Vom 21. Juli 2004", Ministério do Meio Ambiente da Alemanha. Acessado em 2008. <[www.Erneuerbare-energien.de/](http://www.Erneuerbare-energien.de/)>.

Na busca de equilíbrio dos encargos totais e para a divisão dos custos dos prêmios pagos aos geradores entre todas as distribuidoras e níveis da rede, foi adotada a Lei de Energias Renováveis, *Renewable Sources Act*, de 2000 e atualizada em 2004, revisando a meta de participação das FRE na matriz alemã para 12,5% em 2010, e 20% em 2020. Essa lei também contribuiu para as demais energias renováveis ao estabelecer metas e níveis diferenciados e decrescentes de tarifas para cada fonte renovável do programa, além da revisão das tarifas a cada dois anos em função do desenvolvimento do mercado e da tecnologia.

## China

O arcabouço legal chinês cria metas para desenvolvimento das energias renováveis, adotando um sistema de suporte tarifário garantido pela Lei de Energia Renovável que vigora no país desde 2006.

O caso chinês é um bom exemplo de que uma grande produção interna não possui relação direta com a quantidade de instalações domésticas, tendo em vista que esse país apesar de produção comparativamente superior a dos Estados Unidos, conta com baixa quantidade de instalações. Uma das justificativas são os preços praticados pelo governo chinês, excessivamente elevados para o consumidor, em comparação aos demais países incentivadores da energia FV e o fato de exportar grande parte da sua produção de células FV, principalmente para mercados na Alemanha e na Espanha.

Entretanto, um grande sistema FV conectado a rede é esperado para aumentar instalações domésticas, como o anunciado pela agência estatal *Xinhua* para a produção de 100 megawatts de energia fotovoltaica na fazenda em *Dunhuang City*, situada no noroeste da província de Gansu, em um território de 31.200 metros quadrados, e que terá cinco vezes a capacidade atual de produção da maior usina do mundo. Com um prazo para a realização da obra de cinco anos, a estimativa de investimento é da ordem 6,03 trilhões de Yuans, cerca de US\$ 765 milhões<sup>58</sup>.

Iniciativas como essa e a presença de importantes “players” no mercado FV garantem um alto potencial de desenvolvimento para esse mercado. Para os próximos anos, espera-se um amplo programa de suporte a energia FV fazendo desse país um dos maiores mercados de FV em 2013, juntamente com a Europa e Estados Unidos (EPIA, 2009, p. 10).

### **Estados Unidos**

O esforço americano em direção da promoção de energias renováveis surgiu após a crise do petróleo, em 1989, por meio da regulação das Políticas Regulatórias de Concessionárias (Purpa, sigla em inglês). Integrante da Lei Nacional de Energia, essa política obrigava as concessionárias a comprar toda a energia renovável gerada por pequenos produtores, com a finalidade de desenvolver este mercado (TAYLOR, 2007).

Como resultado de anos de impasses políticos e negociações em relação ao uso e ao incentivo às FRE, em 2005 o mercado de FV começou a ser modificado com a aprovação do subsídio que tem como principais mecanismos de incentivo o acréscimo permanente do incentivo, de 10% para 30%, durante um período de dois anos, incluindo todas as tecnologias de energia solar, sendo que após dois anos o crédito volta a ser de 10%; e o estabelecimento de um crédito energético solar de 30%, durante dois anos, para sistemas residenciais, com uma taxa de crédito limitada a US\$ 2,0 (SALAMONI, 2009, p. 80 e 81).

---

<sup>58</sup> Disponível em <<http://www.xinhuanet.com/english2010/>>. Acesso em 14 jan. 2009.

Outro marco nos mecanismos americanos de impulso FV foi a aprovação, em 2006, do programa californiano *Million Solar Roofs Plan* ou *Senate Bill 1* (SB1), a partir desse programa o governo espera a instalação de 1.000.000 de telhados solares, totalizando cerca de 3 GWp de potência FV até 2018. A Comissão Pública de Concessionárias da Califórnia (CPUC) colocou a maior parcela do plano em vigor, quando criou o *California Solar Initiative* para oferecer descontos nos sistemas FV (SALAMONI, 2009).

## **Japão**

Apesar de suas desvantagens geográficas, o Japão é uma referência no que tange a programas de incentivo ao uso residencial da energia FV. Suas motivações principais estão relacionadas à escassez de fontes convencionais de geração de energia, o risco da falta de um abastecimento energético estável, e a importância em agregar as questões ambientais, principalmente à redução de CO<sub>2</sub>. Ao longo dos anos as iniciativas japonesas criaram um “ciclo virtuoso” de dinamismo industrial na produção de células FV resultando em avanços em P&D, no crescimento do mercado e na redução dos custos de produção (WATANABE; WAKABAYASH; MIYAZAWA, 2000).

O mecanismo de incentivo, baseado no *Net Metering* criado em 1992, obrigou que todas as concessionárias comprassem o excedente a um preço mínimo de varejo. E o *Subsidy Programme for Residential PV Systems*, além de um abrangente programa de educação, viabilizou empréstimos com juros baixos, e para novas instalações os descontos foram reduzidos ao longo dos anos, de 50% do custo instalado em 1994 para 12% em 2002, ano de término do programa (SALAMONI, 2009).

A meta japonesa é instalar painéis solares em 70% nas novas residências construídas até 2020 e, contribuir para uma redução entre 60% e 80% de emissão de gases causadores do efeito estufa, em relação aos níveis atuais até 2050 (GREENPEACE, 2007). A partir de 2007, o governo Japonês passou a subsidiar programas para promover os outros setores (comercial, industrial e outras aplicações não residenciais) em larga escala, por considerar a aplicação no setor residencial bem estabilizada (EPIA, 2009).

## Espanha

Assim como em muitas nações, a Espanha iniciou sua política energética para fontes renováveis a partir da crise do petróleo da década de 1970. Tendo em vista a necessidade de diversificação de sua matriz energética, o governo espanhol implantou o Centro de Estudos de Energia, posteriormente transformado no Instituto de Diversificação e Economia Energética que desempenhou importante papel na implantação de programas energéticos no país (GREENPEACE, 2007).

A Lei que estabelece um novo marco para o sistema elétrico espanhol, criando um ambiente propício para a inclusão de FRE, foi regulamentada em 1998, estipulando uma remuneração, a título de incentivo, à geração produzida por FRE. Esses mecanismos não foram suficientes para alavancar a tecnologia FV na Espanha e, em 1999, foi criado o Plano de Fomento às Energias Renováveis, baseado numa política de incentivo de obrigações e teve como objetivo suprir no mínimo, 12% do consumo energético total do país, por meio de fontes renováveis de energia até o ano de 2010 (SALAMONI, 2009).

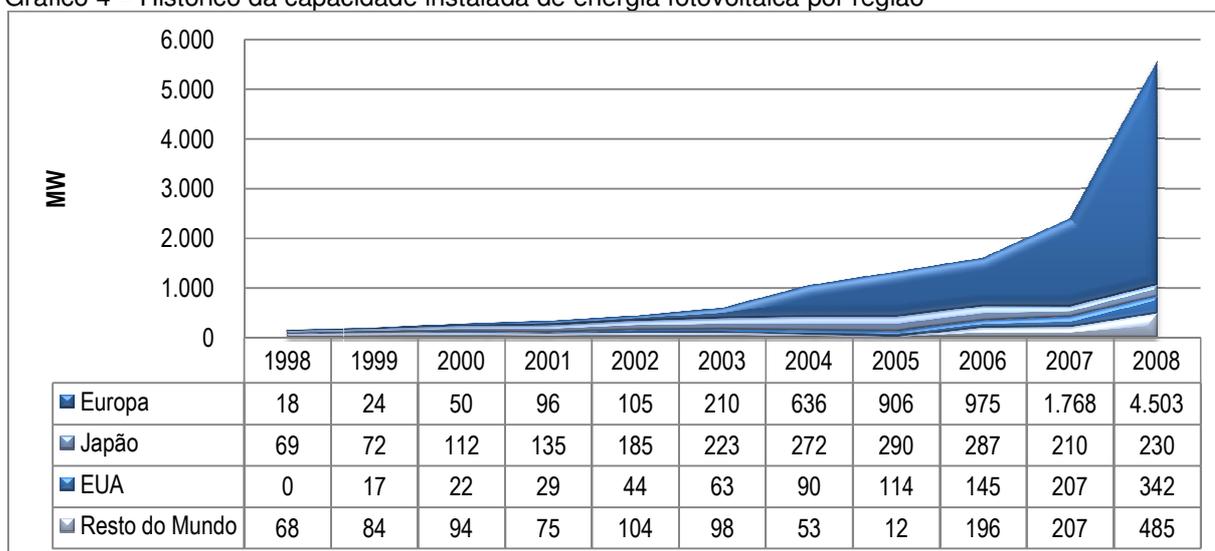
Os Decretos Reais 436/2004, 661/2007 e 1578/2008 definiram incentivos para novas instalações em diferentes formas, além de regulamentar a atividade de produção de energia elétrica em regime especial e aplicação de sistemas FV integrados às edificações. Todas essas ações contribuíram para um impulso a adoção da energia FV espanhola, que cresceu mais de 2.661 MW de novas instalações em 2008, um crescimento próximo a 300%, comparado com o ano de 2007 (SALAMONI, 2009).

A partir de uma análise das estratégias tratadas até aqui, percebemos apesar dos resultados das iniciativas tenham surtido efeito na última década, estas nações estão distantes de seus objetivos iniciais. O motivo está no fato de grande parte das políticas de promoção de energias renováveis encontra-se em estágio inicial de implantação, mantendo um horizonte de dez a vinte anos para sua execução, o que nos leva a crer que as energias FV têm ainda muito espaço para crescer. Estas estimativas são ainda mais otimistas quando pressupomos uma tendência para a redução dos custos dos módulos FV nos próximos anos.

## 2.2.2 O mercado mundial de energia solar fotovoltaica

Um panorama do desenvolvimento da energia FV nos mostra que este mercado garantiu as maiores taxas de crescimento de toda a sua história e a capacidade instalada de sistemas FV em todo o mundo ultrapassou a marca de 14.730 MW no ano de 2008. Se comparada aos 962 MW instalados em 1998, a energia FV cresceu 93% na última década, com uma taxa média de crescimento de 35% ao ano. O valor de todo o mercado de energia FV atingiu a marca de € 13 bilhões em 2007, e a competição entre as grandes fabricantes se tornou cada vez mais intensa com entradas de novas empresas neste mercado potencial (EPIA, 2009, p. 3; EPIA, 2008c, p. 22).

Gráfico 4 – Histórico da capacidade instalada de energia fotovoltaica por região



Fonte: EPIA, 2009, p. 3.

Como observado até aqui, a Europa constitui o maior mercado de energia FV tendo em vista sua capacidade instalada que representou 81% do total de instalações no ano de 2008, guiadas principalmente pelas iniciativas de Alemanha e Espanha, que juntas totalizam 72% do total mundial de instalações FV.



As inovações da geração distribuída acabaram resultando em diversas vantagens para o sistema elétrico, pois a geração próxima à carga diminui as perdas associadas ao transporte de energia, permite uma maior diversificação das tecnologias empregadas na produção de energia e sua escolha obedece a requisitos de necessidade da carga e disponibilidade de recursos energéticos (RODRÍGUEZ, 2002, p. 1 e 2).

Cabe ressaltar que não é apenas com base nesse modelo que a energia FV vem se desenvolvendo, tendo em vista que diversos sistemas são responsáveis pelo aumento da capacidade instalada. De modo geral podemos classificar os sistemas FV em quatro formas primárias de aplicação, segundo o Relatório de Pesquisa da *Photovoltaic Power Systems Programme – PVPS/EIA*<sup>59</sup> (2009):

- a) Geração distribuída doméstica (*Off-grid domestic*): São sistemas que fornecem eletricidade a famílias que não estão conectados à rede elétrica. Fornecem eletricidade para iluminação, refrigeração e outras cargas de baixa potência;
- b) Geração distribuída não-doméstica (*Off-grid non-domestic*): Fornece pequenas quantidades de eletricidade com um alto custo, impossibilitando que a energia FV seja comercialmente competitiva com outras fontes de geração de energia;
- c) Sistemas distribuídos conectados a rede (*Grid-connected distributed*): Instalados para fornecer energia a um cliente conectado a uma rede ou diretamente a rede de eletricidade. Tais sistemas podem ser integrados nas instalações do cliente, em edifícios públicos e comerciais;
- d) Sistemas centralizados conectados a rede (*Grid-connected centralized*): Podem desempenhar as funções de estações de energia centralizada. A energia fornecida por esse sistema não está associada a um cliente particular de eletricidade e desempenha funções de fornecimento de energia em massa;

---

<sup>59</sup> Estabelecida pela Agência Internacional de Energia (IEA) em 1993, este Programa objetiva a reforçar os esforços de colaboração internacional, que acelerem o desenvolvimento e a implantação de energia solar fotovoltaica como uma opção sustentável de energia renovável.



Figura 6 – Sistema distribuído conectado à rede na cidade de Otha no Japão.  
**Fonte:** EPIA, 2008<sup>a</sup>.



Figura 7 – *Grid-connected centralized* em Solarpark Waldpolenz, Brandis, Alemanha.  
**Fonte:** pvresources.com

A análise dos maiores sistemas centralizados conectados a rede nos mostra que a Espanha, como parte de sua estratégia de desenvolvimento de energia FV, é um líder absoluto na quantidade de instalações a partir deste sistema, com empreendimentos localizados em diversas regiões do País.

Quadro 13 – Maiores sistemas centralizados conectados a rede

<i>MWp</i>	<i>País</i>	<i>Localização</i>	<i>Região</i>	<i>Descrição</i>
60	Espanha	Olmedilla de Alarcón	Castilla-La Mancha	Parque fotovoltaico Olmedilla de Alarcón
47	Espanha	Puertollano*	Castilla-La Mancha	Parque solar Puertollano
46	Portugal	Moura**	Alentejo	Moura photovoltaic 104TTP104 plant
40	Alemanha	Brandis***	Saxony	Solarpark Waldpolenz
34.19	Espanha	Arnedo	La Rioja	Planta solar Arnedo
30	Espanha	Osa de 104T Vega	Castilla-La Mancha	Huerta solar Osa de 104T Vega
30	Espanha	Trujillo	Extremadura	Solar Park La Magascona/La Magasquila
30	Espanha	Merida	Extremadura	Parque fotovoltaico SPEX
28	Espanha	Casas de los Pinos	Castilla-La Mancha	Planta fotovoltaica Casas de los Pinos
26	Espanha	Fuente Álamo	Murcia	Parque fotovoltaico Fuente Álamo
24	Coréia	Sinan	Southern Jeolla	Sinan 104TTP104 plant
23.2	Espanha	Lucainena de 104TT Torres	Andalusia	Planta fotovoltaica de Lucainena de 104TT Torres
23.1	Espanha	Abertura	Extremadura	Parque fotovoltaico Abertura Solar
23	Espanha	Jumilla	Murcia	Parque solar Hoya de Los Vincentes
22.1	Espanha	Almaraz	Extremadura	Huerta solar Almaraz
21.2	Espanha	Villarrobledo	Castilla-La Mancha	Parque solar El Calaveron
20.28	Espanha	El Coronil	Andalusia	Parque solar El Coronil I+II
20	Espanha	Calasparra	Murcia	Planta solar fotovoltaico Calasparra I+II+III
20	Espanha	Beneixama	Valencia	Planta solar Beneixama

\* Será ampliada para 70 MW

\*\* Será ampliada para 62 MW

\*\*\* Maior usina FV de thin film (CdTe)

**Fonte:** pvresources (2008)

Funcionando nesses moldes, uma importante característica, que se mostra um diferencial dos sistemas FV é a sua expectativa de vida que variam entre vinte e trinta anos, sendo os módulos as partes mais duradouras do sistema. Da mesma forma, uma importante característica tecnológica da energia FV é sua grande capacidade de aplicação em qualquer escala e tamanho (IEA, 2003, p. 53).

Quadro 14 – Exemplos de aplicações fotovoltaicas

Até 10 W	Calculadoras de bolso, rádios, sensores remoto sem fio, carregadores de pequeno porte, cercas elétricas.
10 W-100 W	Pequenos sistemas de iluminação, caixas de chamada, semáforos, parquímetros, luzes de navegação, sistemas de comunicação de pequeno porte, estações meteorológicas, sistemas solares domésticos, refrigeração médica, proteção catódica, pequenos sistemas de habitações isoladas.
0.1 kW-1 kW	Sistemas de bombeamento e irrigação de tamanhos médios, instalações de dessalinização, propulsão de barcos menores de lazer, sistemas autônomos de edifícios isolados, pequenos sistemas de telhado, pequenos sistemas híbridos.
1 kW-10 kW	Construções de tamanho médio ligadas à rede e infra-estrutura de sistemas integrados; rede sistemas autônomos para edifícios isolados; sistemas híbridos médios.
10 kW-100 kW	Grandes sistemas conectados à rede e infra-estruturas integradas.
0,1 MW até 1 MW e superior	Grandes sistemas conectados a rede.

**Fonte:** NET Ltd., Switzerland apud IEA (2003, p. 54, tradução nossa).

A grande possibilidade de aplicação é uma característica tecnológica que tem garantido grande impulso na sua comercialização, tornando-se um diferencial competitivo em relação a outras formas de produção de energia renovável. Assim, o diferencial da energia FV está em sua capacidade de uso, pois viabilizam desde pequenas aplicações até grandes sistemas conectados a rede. A análise da demanda mundial de energia FV pode ser elaborada com base na divisão em quatro setores e seu respectivo mercado (EPIA, 2008c, p. 22 e 23).

No setor de Bens e Serviços são utilizados em uma ampla gama de produtos de consumo e pequenos eletrodomésticos incluindo relógios, calculadoras, brinquedos, bem como no fornecimento de energia para serviços como pulverizadores de água, sinais de trânsito, iluminação e cabines telefônicas.

Esse setor apresentou cerca de 1% da produção anual global em 2007. Com o aumento da demanda por fornecimento móvel de eletricidade, espera-se que o mercado de bens de consumo continue a crescer em termos absolutos (embora reduza sua participação relativa), especialmente com a introdução de inovadoras tecnologias de eletricidade solar de baixo custo, como células solares orgânicas (EPIA, 2008c).

Nos Sistemas Conectados à Rede as aplicações FV que possuem uma conexão permanente à rede elétrica são classificadas como aplicações conectadas à rede.

Podem ser instalados em cima do telhado ou integrados nos telhados ou fachadas das casas, escritórios e edifícios públicos. As instalações em casas privadas representam o maior crescimento desses sistemas<sup>60</sup>.

Esse segmento é o atual motor de desenvolvimento da energia FV. Enquanto que em 1994 apenas 20% da capacidade de energia FV eram conectadas a rede, em 2007 esse percentual chegou a 90%. Sua grande vantagem é o controle do consumidor sobre sua alimentação e sua transformação em um operador efetivo da sua estação de energia. Com a contínua liberalização do mercado internacional, o grande efeito será alcançar a paridade com os preços da eletricidade doméstica<sup>61</sup> (EPIA, 2008c).

O setor de Eletrificação Distribuída fornece energia para as comunidades do mundo em desenvolvimento que não têm acesso à rede eletricidade. Pode disponibilizar eletricidade para o consumo privado e usos industriais. Os sistemas domésticos fornecem energia para iluminação e para comunicação (rádio, TV e Internet), da mesma forma que pode ser utilizada no bombeamento de água ou nas ferramentas de alimentação.

Apesar dos numerosos programas de desenvolvimento rural que se iniciaram nos países em desenvolvimento, apoiados tanto por programas multi ou bilaterais de assistência, o impacto foi relativamente pequeno. No entanto, espera-se que esse segmento de mercado irá captar uma parte substancial da quota de mercado global FV nas próximas décadas. Em 2007, aproximadamente 4% das instalações FV globais foram dedicadas à eletrificação rural (EPIA, 2008c).

---

<sup>60</sup> Nas aplicações em sistemas conectados à rede, a energia fotovoltaica está cada vez mais sendo utilizada como uma característica de design dos arquitetos, substituindo elementos de cobertura de um edifício. Se um sistema de energia solar é reconhecido como parte integrante parte de um edifício, então o dinheiro gasto na decoração com materiais para fachadas, como o mármore, pode ser investido em módulos solares, neste modelo a energia solar funciona tanto como produtor de energia quanto material de construção (EPIA, 2008, p. 22). Sobre integração de células fotovoltaicas a construção ver "*Building Integrated Photovoltaics: a new design opportunity for architects*", EPIA, 2007.

<sup>61</sup> A energia fotovoltaica também pode ser utilizada no abastecimento de prédios durante picos de energia dos dias quentes de verão, quando os sistemas se sobrecarregam com o aumento de consumo de energia, contribuindo assim para reduzir a carga máxima de eletricidade (EPIA, 2008, p. 22).

Na Eletrificação Industrial Distribuída, os usos mais comuns estão no campo das telecomunicações, especialmente para interligar as zonas rurais remotas, com o restante do país. Na Índia, por exemplo, mais de um terço da capacidade FV é dedicada ao setor das telecomunicações. As fábricas dessalinizadoras representam outra importante demanda de energia FV fora da rede. Outras demandas incluem sinais de trânsito, auxílios à navegação marítima, os telefones de segurança, estações meteorológicas ou monitores de poluição, iluminação remota, sinalização de trânsito e estações de tratamento de águas residuais.

A tendência é que aumente a demanda por esses sistemas, durante a próxima década, especialmente em resposta ao contínuo crescimento da indústria de telecomunicações. Antenas móveis de telefonia e estações repetidoras oferecem um grande potencial principalmente em nações com baixa densidade populacional. A prestação de serviços de comunicações para zonas rurais dos países em desenvolvimento, como parte de alguns pacotes de desenvolvimento social e econômico também se firmam como uma grande oportunidade de mercado futuro para a energia FV. É importante destacar que 4% das instalações globais de energia FV industrial foram usadas para aplicações distribuídas em 2007 (EPIA, 2008c).

### **CAPÍTULO 3**

#### **DINÂMICA TECNOLÓGICA E O SISTEMA SETORIAL DE INOVAÇÃO**

A energia solar é percebida por muitos como uma das alternativas energéticas mais promissoras do milênio e sua concepção exige uma análise da sua dinâmica tecnológica que considere em qual unidade de declínio de custo esta tecnologia vai resultar em um mercado significativo. Nesse desafio de aumentar a eficiência e reduzir custo de produção e instalação, entendemos como nações estão canalizando os seus volumosos investimentos em P&D.

Sabendo que este esforço precisa ser orientado no contexto de um sistema de inovação, a abordagem setorial visa identificar funções básicas de desenvolver, produzir e vender produtos e serviços a uma demanda composta por usuários e consumidores, além de distinguir as relações entre processos de aprendizagem das empresas, competências e o comportamento de organizações e instituições. Essa análise subsidiará a proposição da estrutura setorial do sistema de inovação para o estímulo da tecnologia FV, e como deverão ser coordenadas as dimensões “conhecimentos e domínio tecnológico”, “atores e redes” e “instituições”.

Complementar e subsidiada por este debate será apresentado o estado atual desta energia no Brasil, buscando identificar iniciativas que promovam sua participação na matriz energética nacional. Essa análise pretende identificar as principais oportunidades e ameaças para o País na definição de políticas públicas de incentivo ou regulamentação que promovam a inserção dessa fonte de energia nas redes concessionárias de eletrificação rural e urbana.

### 3.1 Aspectos tecnológicos e os investimentos em P&D

A energia solar é definida conceitualmente como qualquer forma de captação de energia luminosa e térmica proveniente do sol. Essa fonte de energia, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, é também responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia, desta maneira, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do sol.

A energia solar é percebida por muitos como uma das alternativas energéticas mais promissoras do milênio, por ser inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, fornecendo anualmente para a atmosfera terrestre  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia, quantidade que corresponde a dez mil vezes o consumo mundial de energia no mesmo período, portanto um imenso potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia como a térmica e a elétrica (CRESESB, 2008).

O aproveitamento desta fonte inesgotável de energia é possível através de efeitos fototérmicos que absorvem calor a partir da radiação solar e efeitos Fotovoltaicos<sup>62</sup> que proporcionam a conversão direta da luz gerada pelo sol em eletricidade. O efeito fotovoltaico foi relatado pela primeira vez pelo físico francês Edmond Becquerel, em 1839, como resultado do aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Em outras palavras, Becquerel descobriu que certos materiais, geram corrente elétrica se forem expostos à luz (CRESESB, 2008; DHARMADASA, 2009).

Embora o efeito fotovoltaico tenha sido descoberto em 1839, segundo Dharmadasa (2009), pouco foi feito para o seu desenvolvimento comercial até 1950. Como um método de conversão energética, a utilização da tecnologia FV foi ignorada durante a revolução industrial que usufruiu da abundância de carvão, petróleo e gás de baixo

---

<sup>62</sup> Este efeito é viável tecnologicamente através das células fotovoltaicas, também conhecidas como células fotoelétricas ou células solares. O agrupamento de várias destas células forma um “módulo fotovoltaico” e o arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série ou em paralelo (CRESESB, 2008).

custo. A produção destas células em escala comercial iniciou-se em 1940, por meio de um processo criado por Czochraeski que utilizava cristais e silício de alta pureza. A célula FV com eficiência de 4,5% foi produzida pela primeira vez nos em 1954, nos laboratórios Bell. Em 1960, células de silício com 14% eficiência foram produzidas comercialmente e utilizados em aplicações espaciais. Os principais eventos da pesquisa científica continuada são apresentados no Quadro 15.

Quadro 15 – Linha do tempo da tecnologia de energia solar fotovoltaica

<i>Ano</i>	<i>Eventos</i>
1839	Descoberta do efeito fotovoltaico por Edmund Becquerel
1883	A primeira célula solar usando selênio elementar como o material que absorve a luz
1916	Millikan forneceu a prova experimental do efeito foto-elétrico
1918	Czochralski desenvolveu um método que utiliza silício monocristalino
1923	Albert Einstein ganha o Prêmio Nobel por explicar o efeito foto-elétrico
1954	Células solares de silício com 4,5% de eficiência foram produzidas nos Laboratórios Bell

**Fonte:** Dharmadasa (2009, p. 2, tradução nossa).

Até o ano de 1954 as células fotovoltaicas eram capazes de transformar apenas 4% da luz em eletricidade. Nas décadas de 1960 e 1970, a corrida espacial de EUA e URSS gerou a necessidade de uma tecnologia capaz de fornecer energia a seus satélites e as células se tornaram uma alternativa interessante. Complementarmente, a grave crise energética de 1973, também foi um estímulo à procura por fontes alternativas de energia, embora os custos da energia fotovoltaica tenham se mantido altos em relação a outras fontes de energia (CRESESB, 2008; DHARMADASA, 2009).

Considerando este breve histórico, podemos dividir o desenvolvimento das células solares FV, segundo Fraidenraich (2003), em três períodos: no primeiro momento, até começo de 1950, as células funcionavam como sensores de radiação luminosa e a conversão em energia não era seu objetivo principal; em um segundo momento, os sistemas FV se transformaram na principal forma de produção de energia em naves espaciais; e a partir de 1970, as células produzidas para aplicações terrestres superaram a produção das de uso espacial.

Da sua criação até os dias atuais, a justificativa frequentemente utilizada para justificar a impossibilitar a utilização da energia solar FV em larga escala é o custo das células FV. No início, as primeiras células foram produzidas com o custo de US\$600/W e objetivavam atender o programa espacial. Com a ampliação dos mercados e várias empresas voltadas para a produção de células FV, o preço tem reduzido drasticamente ao longo dos anos (CRESESB, 2008). Entretanto, os custos de geração de eletricidade dos sistemas FV ainda são substancialmente superiores aos custos das tecnologias convencionais, especialmente de combustíveis fósseis. Esse fato faz com que muita atenção seja destinada as perspectivas de reduções de preços e competitividade no mercado dos sistemas FV.

Ao longo das últimas décadas, o desenvolvimento comercial das células FV, inovações tecnológicas e a utilização de novas matérias-primas para sua fabricação, permitiram a queda significativa dos custos médios dos módulos FV, que excluindo sistema de instalação e outros custos, passaram de quase US\$ 100 por watt em 1975, para menos de US\$ 4 por watt em 2006<sup>63</sup>.

Nesse debate, a questão é saber em qual unidade de declínio de custo essa tecnologia vai resultar em um mercado significativo, sendo que a análise pelo método da curva de experiência é amplamente utilizada para investigar esta questão. De modo geral essa metodologia descreve como diminuem os custos unitários com o crescimento da produção. Essas curvas são caracterizadas por uma taxa de crescimento do mercado num cenário que pressupõe uma redução percentual contínua dos custos com cada duplicação da tendência das taxas de crescimento de mercado verificada nos últimos anos de produção acumulada (POPONI, 2003; IEA, 2000).

---

<sup>63</sup> Segundo Kurzweil (2007) para algumas tecnologias FV, é esperado que os custos de produção alcancem um nível de US\$ 1 por watt nesta década 2010, tornando-a competitiva com fontes convencionais na produção de eletricidade, como o carvão. Outro meio de redução dos preços dos módulos será possível quando ocorrer o amadurecimento de uma nova geração de células fotovoltaicas baseadas em nanomateriais que vem sendo desenvolvidas por uma série de companhias dotadas de capital de risco e dispostas a concorrer com o mercado mundial de petróleo.

Diversos estudos estimam taxas de progresso para células FV, tendo em vista o uso de diferentes períodos, regiões e componentes e os resultados apontam que inovações e experiências adquiridas na produção dessas células resultaram em um aumento significativo da sua eficiência e rentabilidade nas últimas décadas. Um resumo destes estudos segue no Quadro 16.

Quadro 16 – Taxas de progresso para células FV na literatura

<i><b>Autor</b></i>	<i><b>Taxa de Progresso</b></i>	<i><b>Período</b></i>	<i><b>Região</b></i>	<i><b>Componente</b></i>
IEA (2000)	79	1976–1996	EU	Módulos
Harmon (2000)	79.8	1968–1998	World	Módulos
Parente et al. (2002)	77.2	1981–2000	World	Módulos
	79.8	1981–1990	World	Módulos
	77.4	1991–2000	World	Módulos
Poponi (2003)	75	1976–2002	World	Módulos
	80.5	1989–2002	World	Módulos
Schaeffer et al. (2004)	80	1976–2001	World	Módulos
	77	1987–2001	World	Módulos
	78	1992–2001	Germany	BOS
	81	1992–200	Netherlands	BOS
Beneking (2007)	80	1980–2015	World	Módulos

**Fonte:** Bhandari; Stadler (2009).

O estudo Bhandari e Stadler (2009), a partir da análise da curva de experiência, conclui que o aumento da capacidade instalada acumulada tem potencial significativo na redução do módulo FV. Concluem ainda que caso o ritmo mais rápido no crescimento das instalações implica na diminuição do preço do sistema em ritmo acelerado, e que acabará por antecipar o tempo necessário para se alcançar a paridade do sistema.

A evolução declinante do custo de produção das células por watt descrita, afeta diretamente a sua demanda e a rentabilidade relativa para sua fabricação, e os produtores respondem a esses estímulos do ambiente econômico através de novos avanços técnicos de produção. Porém, essa resposta ocorre dentro do limite

estabelecido pela trajetória tecnológica que pode ser conducente ou impor restrições crescentes a sua produção<sup>64</sup>.

Os semicondutores que convertem a energia solar em eletricidade são disponíveis em diversos dispositivos FV, embora existam duas principais tecnologias para a sua produção comercial: as células baseadas em fatias *wafers* de Si (Silício) que podem ser monocristalinas ou policristalinas e células de *thin-films*, ou filmes finos.



Figura 8 – Células baseadas em silício monocristalino, silício policristalino e os *thin films*.

Fonte: [www.solarenergydesign.com.au](http://www.solarenergydesign.com.au) e [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)

A produção das Células Solares Monocristalinas, ou monocristal (*single crystal*), se dá a partir de um *wafers* de cristal de silício com alta pureza. Na maioria das vezes são mais eficientes, permitindo a fabricação de módulos FV em escala comercial com eficiência entre 13% a 19% de conversão de energia solar em eletricidade.

As Células Solares Policristalinas são cortadas de um bloco de silício multi-cristalino de qualidade inferior e com menor eficiência, mas com produção mais barata, se comparada com as monocristalinas, permitindo a fabricação de módulos FV em escala comercial com eficiência de 12% a 15% de conversão de energia solar em eletricidade (SILVA, 2006).

No caso das Células *Thin-films* o processo de fabricação é diferente. Essas células são produzidas por meio de um material semicondutor depositado na forma de um filme fino num substrato como vidro, alumínio ou aço, que pode possuir distintas características e formas. As células solares de filme fino na maioria das vezes alcançam menos da

---

<sup>64</sup> Um exemplo desta condição é o do motor a combustão interna a gasolina, que tem na mudança de preço do petróleo um estímulo para substituição da gasolina e a economia de energia, no entanto, esta substituição é limitada pela tecnologia que define o conjunto de possíveis avanços tecnológicos (DOSI, 2006, p. 52).

metade da eficiência das melhores células, entretanto sua produção é muito mais barata. Sua aplicação tecnológica mais recorrente está no fornecimento de energia a aparelhos eletrônicos portáteis (SILVA, 2006).

Quadro 17 – Eficiência de módulos e células fotovoltaicas

Tecnologia	Thins-film				Baseado em wafer cristalino	
	Silício Amorfo	Telureto de cádmio (CdTe)	Cl(G)S	a-Si/m-S	Mono-cristalino	Poli-cristalino
Eficiência da célula*	5 – 7%	8 – 11%	7 – 11%	8%	16 – 19%	14 – 15%
Eficiência do módulo					13 – 15%	12 – 14%
Área requerida por módulo em kW**	15 m <sup>2</sup>	11 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>	12 m <sup>2</sup>	7 m <sup>2</sup>	8 m <sup>2</sup>

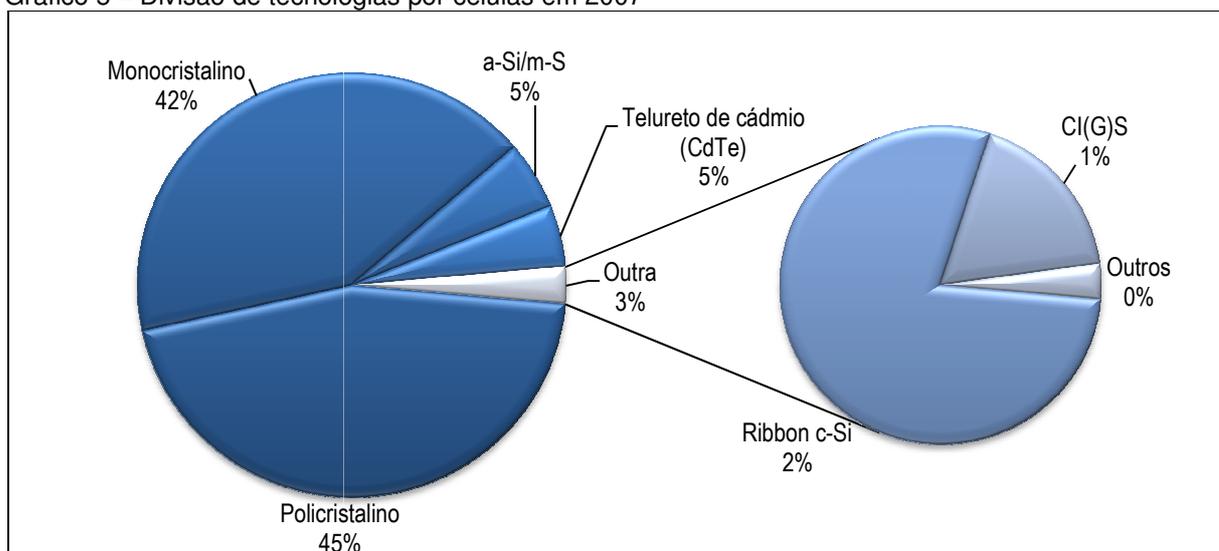
\*Condições padrão de teste (CPT): 25 °C, intensidade luminosa de 1.000 W/m<sup>2</sup> e massa de ar = 1,5

\*\*Produtos fotovoltaicos e matrizes são classificadas pelo poder que geram à CPT

Fonte: EPIA (2008c, p. 17).

Ainda que a maioria das células FV construídas até hoje utilizem “*wafers*” de silício monocristalino ou policristalino, e que na atualidade, somadas representam 87,4% de todo o mercado, espera-se que os *thin-film* ganhem uma fatia muito maior do mercado FV dada a suas vantagens no baixo consumo material, baixo peso e uma boa aparência (EPIA, 2008c).

Gráfico 5 – Divisão de tecnologias por células em 2007



Fonte: Elaboração própria a partir de EPIA (2008c, p. 16).

De acordo com a avaliação publicada recentemente pela Comissão Europeia<sup>65</sup>, os investimentos agregados em tecnologias FV em 2007, nos países da Europa foram de € 384 milhões, ou US\$ 571 milhões, se contabilizados os fundos públicos que foram parte significativa, 42%, ou cerca de US\$ 240 milhões. Com base na avaliação das 30 principais empresas do setor, os investimentos em P&D das empresas em energia FV somaram € 221 milhões (US\$ 329 milhões) em 2007. Apenas quatro das quinze principais fabricantes de módulos FV estão localizados na UE, porém 28,5% de toda produção de células FV foi da União Europeia (IEA, 2008).

Quadro 18 – Despesas públicas com P&D em 2008 nos países do IEA-PVPS

<i>País</i>	<i>Em milhões de €</i>	<i>Em milhões de US\$</i>
Estados Unidos	83,3	122,5
Alemanha	59,4	87,4
Coréia	35,92	52,83
Japão	24,33	35,78
Grã-Bretanha	14,8	21,8
Espanha	12	17,6
França	12	17,6
Holanda	12	17,6
Suíça	9,2	13,5
Noruega	6,7	9,9
Itália	5	7,4
Austrália	4,20	6,18
Dinamarca	3,3	4,9
Suécia	3,0	4,4
Áustria	1,59	2,34
Canadá	1,56	2,29
México	0,32	0,47
Israel	0,24	0,35

Fonte: EIA-PVPS, 2009, p. 22.

Considerando os orçamentos públicos para pesquisa e desenvolvimento (P&D) em energia FV dos países membros do IEA-PVPS, o total de despesas chegou a US\$ 425 milhões o que representa um aumento de quase 30% em relação ao ano de 2007. Entre os países com os volumes mais significativos de despesas nesta área estão os Estados Unidos, a Alemanha, o Japão e a Coréia. França, Holanda, Espanha e Reino Unido também demonstraram forte compromisso com as atividades de P&D. Suíça e Noruega se destacam tanto pelo aumento dos orçamentos de P&D, quanto pelo

<sup>65</sup> *Investing in the Development of Low Carbon Technologies*. Disponível em <<http://ec.europa.eu/>>.

tamanho dos países e seu nível de investimento em relação a outras áreas (IEA-PVPS, 2009, p. 22).

Líder absoluto no financiamento público em atividades de P&D, os Estados Unidos por meio do seu Departamento de Energia, tem como meta o desenvolvimento de sistemas confiáveis de energia FV, com custo competitivo com a eletricidade proveniente de fontes convencionais. Os programas de fundos FV trabalham para:

- a) Aumentar a eficiência das células FV na conversão da luz do sol em eletricidade;
- b) Reduzir o custo de produção das células e módulos FV;
- c) Reduzir os custos de instalação, interconexão, e certificação para edifícios residenciais e comerciais;
- d) Aumentar a vida útil e a confiabilidade do sistema operacional.

Seus principais laboratórios para apoio a programas FV são o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e o *Sandia National Laboratories* (Sandia). Em 2008, este país expandiu o *Solar America Initiative*, para o foco nos caminhos tecnológicos mais prováveis para se chegar à competitividade de custos até 2015 (IEA-PVPS, 2009, p. 21 e 22).

Na Alemanha, o Ministério Federal do Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) destinou aproximadamente 40 milhões de euros para 130 projetos de P&D em tecnologia FV, em 2008. A distribuição do orçamento permanece baseada nas tecnologias de silício, com 59% do total, seguido por tecnologias thin-films com 32%. O Ministério Federal de Educação e Pesquisa (BMBF) também suporta P&D em diferentes aspectos do PV, dando ênfase em temas como a ciência dos materiais, incluindo nanotecnologia, métodos analíticos e experimentais e, sinergias com outros domínios da investigação, tais como microeletrônica e biônica (IEA-PVPS, 2009, p. 21-22).

O financiamento para P&D Coreano se mostrou quase três vezes maior em relação a 2007, garantindo a este país a posição de terceiro financiador de P&D entre os países do IEA-PVPS. Em 2008, o *Energy Technology Evaluation and Planning* (KETEP)

assumiu o papel de principal programa coreano de apoio à energia FV. A nova estratégia do governo para financiamento de P&D é composta de quatro programas, o *Strategic Technology Programme*, *Breakthrough Technology*, *Core Technology* e o *Demonstration and Planning Programme*. Apenas *Breakthrough Technology* é liderado pelas universidades ou institutos de pesquisa. Os outros programas são conduzidos pela indústria (IEA-PVPS, 2009, p. 21-22).

Em 2008, o plano Japonês “*Four-Year Plan for Photovoltaic Power Generation Technology Research and Development*”, que teve início em 2006, continuou com dois grandes projetos da *Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO), o “*R&D of Nextgeneration PV Generation System Technologies*”, e a fase II do “*PV System Technology for Mass Deployment*”.

O “*Development of Technologies to Accelerate the Practical Application of Photovoltaic Power Generation Systems*” começou em 2008, e foi lançado o “*Research and Development on Innovative Solar Cells*” (*International Research Center for Innovative Solar Cell Programme*). Projetos de pesquisa básica, incluindo desenvolvimento tecnológico FV, foram planejados e propostos ao público convidado pelo Ministério da Educação, Cultura, Desporto, Ciência e Tecnologia (MEXT), anteriormente conduzidas principalmente pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI) (IEA-PVPS, 2009, p. 21-22).

Segundo Relatório do EIA (2008), as principais prioridades de investimento em pesquisa de desenvolvimento em sistemas FV de *wafers* de silício e os *thin-films*, são diferentes nas próximas décadas e se concentram no aumento da eficiência, na redução do consumo de matéria prima e outros aspectos, conforme Quadro 19.

Quadro 19 – Perspectivas e questões-chave para o Silício Cristalino e os *thin-films*

<b>Silício Cristalino</b>	<b>2010–2015</b>	<b>2015–2020</b>	<b>2020-2030/2050</b>
Eficiência	Monocristalino: 21% Policristalino: 16%	Monocristalino: 23% Policristalino: 18%	Monocristalino: 27% Policristalino: 21%
Aspectos da Indústria (Consumo de Silício)	<5g/Wp	<3g/Wp	<2g/Wp
Aspectos de P&D	Novos materiais de silício e de transformação <i>Cell contacts, emitters and passivation</i>	Wafers de silício de baixo defeito Melhoria das estruturas do dispositivo	Tecnologias Wafer equivalente Estrutura de dispositivo com conceitos inovadores
<b>Thin-films</b>	<b>2010–2015</b>	<b>2015–2020</b>	<b>2020-2030/2050</b>
Eficiência	Thin film Si: 10% CIGS: 14% CdTe: 12%	Thin film Si: 12% CIGS: 15% CdTe: 15%	Thin film Si: 15% CIGS: 18% CdTe: 18%
Aspectos da Indústria	Alta taxa de deposição <i>Roll-to-roll manufacturing packaging</i>	Processos de produção simplificados Baixo custo de <i>packaging</i>	Grandes unidades de produção de alta eficiência
Aspectos de P&D	Grande área para descarte dos processos Substratos melhorados e óxido condutor transparente	Melhoria das estruturas celulares Melhoria das técnicas de descarte	Conceitos e materiais avançados

Fonte: EIA (2008, p. 37 e 38, tradução nossa).

Sabendo que mais de 85% do mercado de módulos FV é baseado na tecnologia de *wafer* de silício, o principal desafio para os módulos de Silício Cristalino é melhorar sua eficiência e a quantidade de materiais consumidos. No caso dos *thin-films*, aumentos nos níveis de P&D são necessários tanto para viabilizar uma maior comercialização no mercado, criando a experiência necessária na produção industrial e a confiabilidade de longo prazo (EIA, 2008, p. 37-38).

Segundo o Relatório em questão, as prioridades identificadas para a energia FV, vão da investigação de alternativas à matéria prima básica até a implementação de reciclagem para as diversas tecnologias FV e podem ser classificadas em curto, curto-longo e médio longo prazo, conforme Quadro 20.

Quadro 20 – Prioridades para a energia solar fotovoltaica

1. Melhorar o desempenho técnico e de custo-eficiência de células solares, módulos e componentes do sistema, tanto para os já existentes, bem como para novas tecnologias de células solares.	Curto-longo prazo
2. Melhorar a capacidade de fabricação de componentes e sistemas para a indústria de produção em escala, com produção em massa considerável e potencial de redução de custos, aproveitando economias de escala e escopo.	Curto prazo
3. Desenvolver soluções técnicas de alta penetração e integração de sistemas fotovoltaicos nas redes elétricas (redes inteligentes e armazenamento).	Curto-médio prazo
4. Design dos módulos como material de construção e elemento arquitetônico, atendendo os requisitos técnicos, funcionais e estéticos, além de metas de custos.	Curto prazo
5. Desenvolver novas tecnologias e conceitos inovadores com desempenho potencialmente significativos e/ou vantagens de custo	Médio-longo prazo
6. Aplicar avaliações do ciclo de vida e reduzir o impacto ambiental dos sistemas fotovoltaicos.	Médio-longo prazo
7. Desenvolver e implementar soluções de reciclagem para as diversas tecnologias fotovoltaicas.	Longo-médio prazo
8. Continuar a investigar alternativas em semi-condutores para uso fotovoltaico para atenuar o risco do mercado não atender as nações em desenvolvimento que adotarem a implantação em massa de sistemas fotovoltaicos.	Longo prazo

**Fonte:** EIA (2008, p. 39, tradução nossa).

Frente à dificuldade de planejamento futuro da evolução tecnológica da energia FV uma importante ferramenta estudada por Jäger-Waldau (2004), o *Roadmap* de P&D tem como base o estabelecimento de um amplo consenso entre as diferentes tecnologias, indústrias e instituições de pesquisa, bem como de toda a gama de materiais para sistemas. Para essa finalidade são necessárias reuniões com peritos, workshops e simpósios, organizados para estimular a comunicação e discussão, fazendo da sua preparação um processo interativo e contínuo, tratando ainda de questões como o marketing do produto e normalização, as questões ambientais, bem como a questão dos recursos humanos necessários. Entretanto, os esforços em P&D para estímulo de inovações precisam ser catalisados e percebidos no contexto de um sistema setorial a ser analisado na próxima seção.

### 3.2 As especificidades do Sistema Setorial de Inovação

A fundamentação desta seção entende que o movimento no sentido de um novo padrão sustentável de desenvolvimento é tanto uma questão de métodos de regulação, incentivos econômicos e mudanças institucionais quanto uma questão de inovação tecnológica. Isso é justificado pela grande ênfase dada a incentivos e regulação em detrimento do grande potencial proporcionado pela mudança técnica (FREEMAN, 1996, p. 27-39). Nesse sentido, precisa-se de um entendimento mais específico do sistema capaz de orientar inovações no sentido de desenvolver processos tecnológicos para produção de energia FV o que será desenvolvido a seguir.

O direcionamento das inovações exige uma abordagem sistêmica, pois constituem sistemas dinâmicos específicos ao mesmo tempo em que integram sistemas diversos<sup>66</sup>. Dessa maneira, um primeiro desafio desta abordagem é a definição dos limites desse sistema, que podem ser abrangentes e enfatizar a importância do aparato institucional e econômico para as inovações ou específicos compostos por agentes no nível da firma e de seu setor de atividade.

Os sistemas que englobam instituições responsáveis pela introdução e difusão de novos produtos e processos numa economia nacional, são reconhecidos na literatura como Sistemas Nacionais de Inovação – SNI. Ainda que a literatura reconheça a contribuição pioneira de *Friedrich List*<sup>67</sup>, o primeiro uso explícito do conceito de SNI é conferido a Freeman (1987), em um estudo aplicado ao caso japonês, que concluiu que novas tecnologias são criadas, incorporadas, modificadas e difundidas a partir da atuação interativa de uma rede de instituições públicas e privadas.

---

<sup>66</sup> Independente do seu contexto, as abordagens de Clark, Perez Trejo e Allen (1995, apud Dalcomuni, 2001, p. 211), entendem sistema como fenômenos completos compostos por elementos interconectados. Seus limites os separam de seu ambiente e o padrão de relações que qualquer sistema estabelece com o seu ambiente vai definir se ele é isolado, fechado ou aberto.

<sup>67</sup> Friedrich List (1789-1846), analisando o desenvolvimento das forças produtivas, ressaltou a necessidade de uma responsabilidade governamental tanto pela educação e treinamento como pelo suporte infraestrutural ao desenvolvimento econômico (LUNDVALL, 1992, apud DALCOMUNI, 2001).

Anos mais tarde, Lundvall (1992) passou a tratar dos sistemas nacionais a partir da teoria da inovação e do aprendizado interativo, tornando-se um dos autores mais identificados com o conceito. Para o autor, o aprendizado e a busca são diretamente afetados pela estrutura econômica e institucional, composta de subsistemas e o SNI, determina grande parcela da capacidade de aprendizado, de inovação e de adaptação às mudanças do ambiente de um país, nas suas palavras:

[...] a system of innovation is constituted by elements and relationships which interact in the production, diffusion and use of a new, and economically useful, knowledge and that a national system encompasses elements and relationships, either located within or rooted inside the borders of a nation state (LUNDVALL, 1992, p. 2).

A partir deste conceito, as dimensões que definem um sistema de inovação são as estruturas de produção e o aparato institucional. Esse sistema possibilita o processo inovativo ao ser estruturado e articulado a forma de um tripé, formado por elementos como a inovação tecnológica, o aprendizado, principalmente interativo, e o próprio aparato institucional (LUNDVALL, 1992, p. 10).

Se considerarmos que a capacidade inovativa emerge da afluência de fatores sociais, institucionais e culturais específicos aos ambientes nos quais estão inseridos os agentes econômicos, muitas vezes se faz necessário uma abordagem setorial do sistema de inovação na forma de um refinamento das noções de SNI com a finalidade de captar a diversidade dos processos históricos e de desenhos políticos institucionais existentes entre os países e regiões<sup>68</sup>.

Ainda que a literatura existente nos forneça uma ampla base de investigações sobre sistemas setoriais, especialmente estudos industriais, outra dificuldade está no fato dessas pesquisas serem feitas com diferentes metodologias e níveis de desagregação. A dificuldade de se utilizar dessa literatura como suporte reside na tentativa em se

---

<sup>68</sup> Mesmo que não seja objeto de discussão no presente trabalho, destaca-se a proposta de delimitação dos sistemas de inovação em termos geográficos em níveis subnacionais a partir do conceito de Sistemas Locais de Inovação – SLI desenvolvida principalmente no âmbito da Rede de Pesquisa em Sistemas e Arranjos Produtivos e Inovativos Locais, que pode ser analisada em <<http://www.redesist.ie.ufrj.br/>>.

estabelecer comparações entre os setores no que se refere ao papel dos agentes, a estrutura, dinâmica da produção, direção e taxa de inovação e os efeitos dessas variáveis sobre o desempenho de empresas e países.

Diante destas dificuldades, os trabalhos de Malerba (1999 e 2003) ampliam o conceito de Sistema Setorial de Inovação – SSI, garantindo uma visão integrada das principais dimensões dos setores. Esse esforço possui duas motivações principais, quais sejam, descrever o funcionamento, a estrutura e dinâmica de um setor em suas funções básicas para desenvolver, produzir e vender produtos e serviços a uma demanda composta por usuários e consumidores; além de distinguir as relações entre processos de aprendizagem das empresas, competências e o comportamento de organizações e instituições em um setor. Nas palavras de Malerba (1999), um SSI é definido como:

A sectoral system of innovation and production is composed by the set of heterogeneous agents carrying out market and non-market interactions for the generation, adoption and use of (new and established) technologies and for the creation, production and use of (new and established) products that pertain to a sector ("sectoral products"). A sectoral system has a knowledge and a technological base, and key links and complementarities among products, knowledge and technologies, which greatly affect the creation, production and use of the "sectoral products" (MALERBA, 1999, p. 4).

Nesta perspectiva a abordagem a partir de SSI trata a firma como núcleo central desse processo, inserida numa análise integrada do seu setor, identificando assim a estrutura e dinâmica tecnológica setorial. Em outros termos, ainda que o macroambiente econômico e institucional seja fundamental para um bom desempenho da firma ele é apenas contexto, pois o que tende a definir o escopo econômico-institucional do espaço geográfico na qual se insere são as suas próprias atividades econômicas, que também são influenciadas por suas estruturas dinâmicas (DALCOMUNI, 2001, p. 217 e 218)<sup>69</sup>.

As vantagens de uma visão a partir de SSI estão basicamente na melhor compreensão da estrutura setorial, dos limites e transformações dos agentes e suas interações e podem ser úteis em quatro aspectos principais: a) análise descritiva das diferenças e

---

<sup>69</sup> Para uma análise teórica mais aprofundada acerca do resgate do papel da firma enquanto *locus* de excelência da inovação ver Dalcomuni (2001).

semelhanças entre a estrutura, organização e os limites dos setores; b) compreensão das diferenças e semelhanças entre o trabalho, a dinâmica e a transformação de setores; c) identificação dos fatores que afetam a inovação, desempenho e competitividade internacional das empresas e países em diferentes setores; d) desenvolvimento de novas indicações de políticas públicas (MALERBA, 2003, p. 332).

O processo de geração e adoção de novas tecnologias e a organização da inovação e da produção no nível setorial é afetado por três dimensões dos sistemas setoriais classificado por Malerba (2003, p. 332-335) como conhecimento e domínio tecnológico, atores e redes e instituições.

- a) Conhecimento e domínio tecnológico: Sendo qualquer setor passível de caracterização por uma base de conhecimentos específicos, tecnologias e insumos, o foco nesta dimensão de modo dinâmico coloca no centro da análise questões como os limites setoriais, que geralmente não são fixos, e mudam ao longo do tempo.
- b) Atores e redes: Um setor é composto por agentes que podem ser organizações e indivíduos, sendo que as organizações podem ser firmas, instituições ou associações. No SSI os agentes são ligados de diversas maneiras através do mercado e das relações de mercado, além de serem caracterizados por dificuldades específicas de processos de aprendizagem, dada suas crenças, objetivos, estruturas organizacionais e comportamentos. Essas características colocam ênfase diferente no papel da demanda que não é vista como um conjunto agregado de compradores semelhantes, mas como composta por agentes heterogêneos que interagem de diversas maneiras com os produtores.
- c) Instituições: A interação entre os agentes é moldada pelas instituições que incluem normas, rotinas, hábitos comuns, práticas estabelecidas, regras, leis, entre outras. Nessa dimensão muitas instituições são nacionais, como o sistema de patentes, enquanto que outras são específicas do SSI. Nem sempre instituições nacionais moldam o sistema setorial, e muitas vezes instituições de um setor tem uma importância em termos estratégicos ou competitivos que acabam surgindo como nacional.

Uma maneira útil de analisar o funcionamento de um sistema tecnológico é focar em um número de funções que são servidas no sistema, estas funções constituem um nível intermediário entre os componentes de um sistema tecnológico e seu desempenho. A literatura sobre sistema de inovação sugere a existência de cinco funções básicas que precisam ser servidas em um sistema tecnológico, quais sejam: a criação e difusão de novos conhecimentos; a orientação na direção da pesquisa entre os usuários e fornecedores de tecnologia; o fornecimento de recursos como capital e competências; a criação de economias externas positivas, tanto no mercado e quanto extra-mercado; a formação de mercados, que pode ser induzida por ações governamentais para eliminar os obstáculos da legislação ou por várias organizações destinadas a legitimar a tecnologia (JACOBSSON; BERGEK, 2004, p. 818-819).

Essas funções não são independentes uma da outra, e as mudanças em uma podem levar a mudanças nas demais. Como exemplo, a criação de um mercado inicial pode atuar como um mecanismo de incentivo para os novos que trazem novos recursos para o sistema tecnológico. A análise das funções do sistema busca contrapor duas dificuldades, a primeira é a definição da fronteira do sistema, que por natureza se mostra uma tarefa muito difícil; e a segunda é o fato de não haver razão para esperar que uma estrutura particular do sistema deva ser relacionada ao desempenho de um sistema tecnológico de uma forma clara e inequívoca. Dessa maneira, na abordagem em termos de funções é possível uma combinação específica de atores ou uma determinada estrutura institucional para formas de geração, difusão e utilização de uma tecnologia nova (JACOBSSON; BERGEK, 2004, p. 818 e 819).

Em um estudo específico para da energia FV, Kamp *et al.* (2009) apresentam uma série de funções desses sistemas, com o intuito de mapear as atividades de inovação, além de descrever e explicar sua dinâmica, são elas:

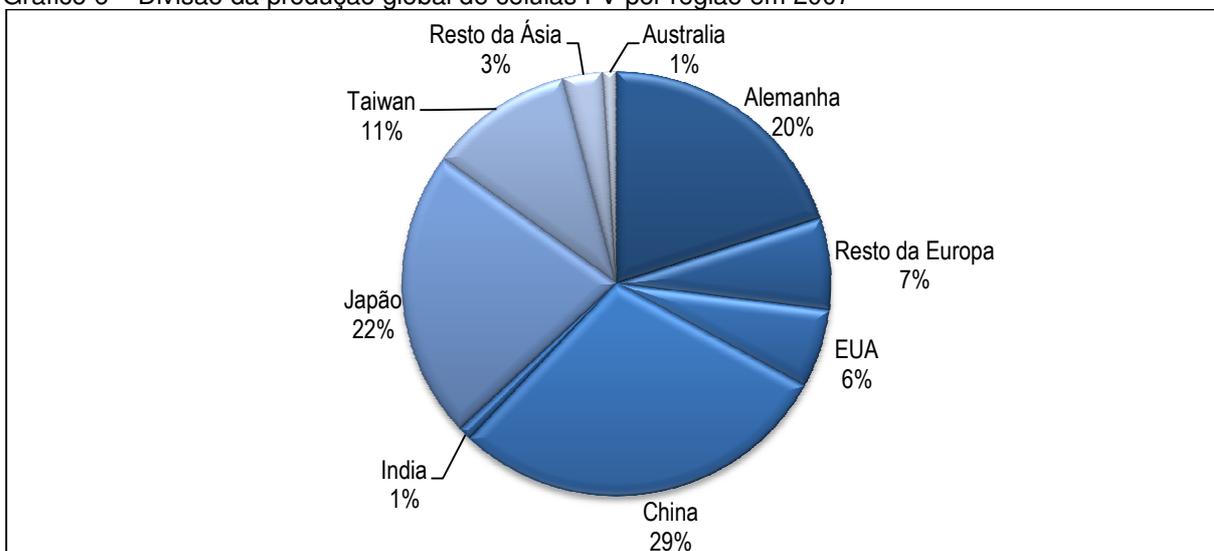
- a) As atividades empresariais transformam o potencial de desenvolvimento de novos conhecimentos em oportunidades de negócio;
- b) O desenvolvimento de conhecimento serve como um recurso ao processo inovativo, que tem na aprendizagem o principal processo;

- c) A difusão de conhecimentos por meio de redes transfere este conhecimento entre os diferentes atores ligados;
- d) A orientação a pesquisa distribui os recursos de forma eficiente, concentrando esforços em caminhos específicos;
- e) A formação do mercado cria espaços protegidos para inserção de novas tecnologias para mitigar a competição com as existentes;
- f) A mobilização de recursos financeiros, humanos e materiais são os insumos básicos de todas as atividades no âmbito do sistema;
- g) A neutralização da resistência a mudança funciona como um catalisador que cria legitimidade para a nova tecnologia.

Tanto a realização individual de cada função do sistema quanto à dinâmica de interação entre elas são de grande importância, tendo em vista que as interações positivas entre as funções do sistema podem levar a um reforço dinâmico dentro do sistema de inovação, criando um círculo virtuoso que promova o desenvolvimento e difusão da tecnologia. Do contrário, resultados negativos da interação entre as funções do sistema, levam à diminuição das atividades em relação a outros sistemas que podem abrandar ou mesmo parar o progresso técnico (KAMP *et al.*, 2009).

A constituição de sistemas de inovação para energia FV são esforços recentes tendo em vista que a própria indústria é relativamente nova em termos de desenvolvimento tecnológico e penetração no mercado. Se analisarmos a produção global de células FV por região em 2007, teremos a seguinte divisão:

Gráfico 6 – Divisão da produção global de células FV por região em 2007



Fonte: Elaboração própria a partir de EPIA (2008c, p. 26).

Fato é que estes países não seriam capazes de manter significativas participações na produção de células FV sem um sistema de inovação capaz de garantir à indústria, o suprimento de ganhos de eficiência na produção e queda dos custos de produção de materiais FV com aumento na escala de produção. Nesse sentido, é essencial a compreensão mínima do funcionamento destes sistemas na China, no Japão e na Alemanha, responsáveis por 71% da produção mundial de células FV.

Com capacidade de produção crescente, a China é um *player* emergente no mercado global da indústria de energia solar FV. O sistema de inovação para o FV é focado em torno de tecnologias convencionais de silício cristalino (mono e poli-Si-Si). Para trabalhar no desenvolvimento dos materiais utilizados em células FV este país conta com trinta institutos de pesquisa e universidades que mantêm fortes relações com as empresas deste sistema, que dedicam ao P&D interno um décimo do volume de suas vendas, o que desempenha um papel fundamental no reforço da capacidade tecnológica e da competitividade das empresas (MARIGO; FOXON; PEARSON, 2009).

Segundo os mesmos autores, na frente institucional deste sistema o *National Development Reform Commission* (NDRC) é o órgão responsável pela coordenação das políticas de promoção e apoio à energia FV no sistema de inovação que conta ainda com outras instituições responsáveis pelo processo de inovação, incremento da

demanda, políticas de suporte e facilitações, que se relacionam através de influências, fundos e conhecimentos.

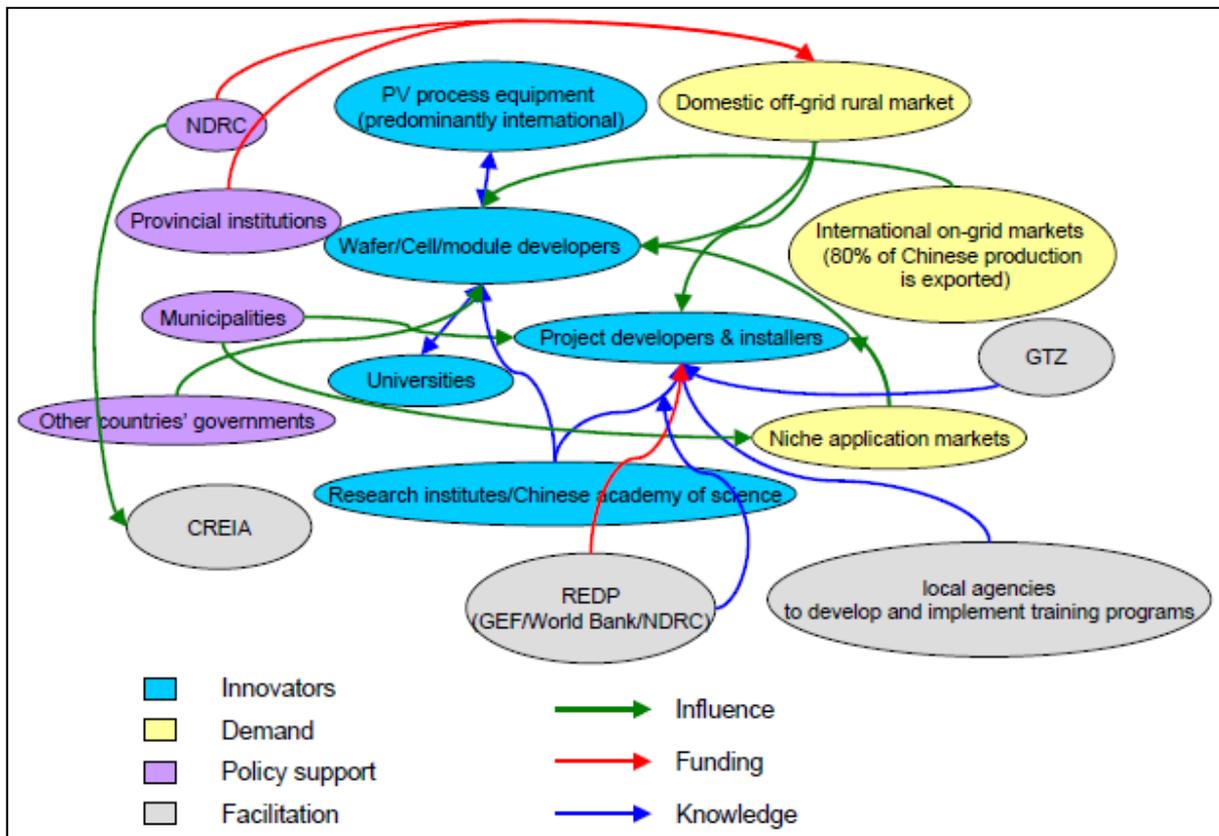


Figura 9 – Sistema de inovação Chinês para tecnologia FV.

Fonte: Marigo, Foxon e Pearson (2009)

Embora o mercado interno criado por meio de grande programa governamental de eletrificação rural tenha sido fundamental para o desenvolvimento de algumas empresas, o direcionamento dos esforços inovativos objetiva a exportação para os mercados mais importantes de instalações FV localizados na Europa e nos Estados Unidos.

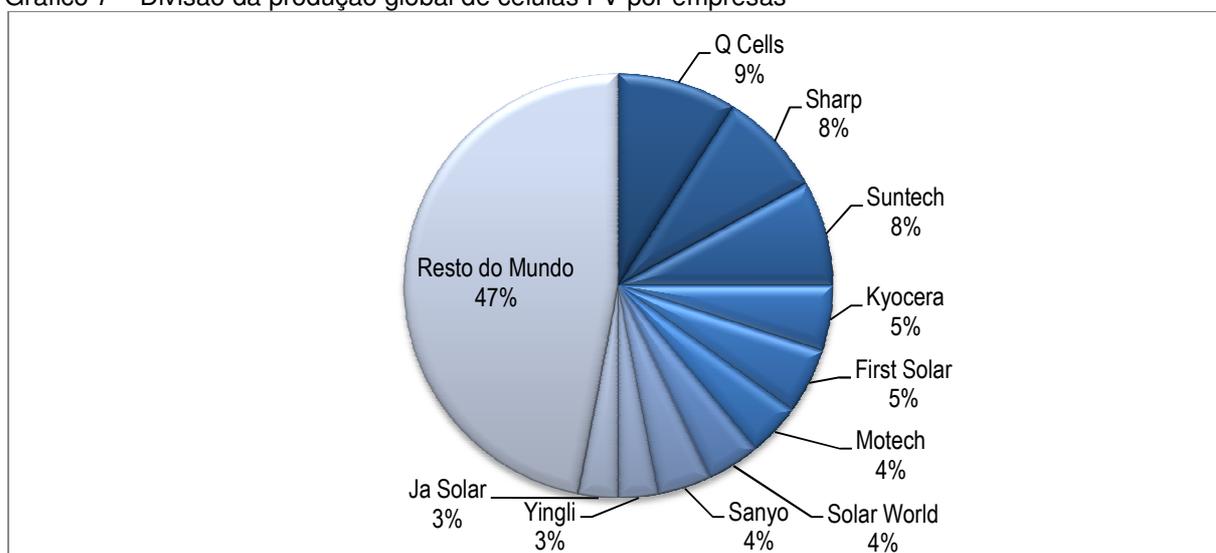
No caso da Alemanha, a existência de um forte setor industrial com sofisticados métodos de fabricação permitiu a integração vertical da indústria FV a partir de matérias primas para o módulo de fabricação. Essa integração garante mais segurança sobre as flutuações dos mercados FV caracterizado por um número limitado de *players*. E a participação em operações de *upstream* dá às empresas o potencial para o controle de

áreas de alto valor agregado que possam ter um impacto fundamental na estrutura de custos de toda a indústria (MARINOVA; BALAGUER, 2005).

No caso japonês a existência de grande indústria de eletrônicos criou uma base natural para a diversificação da indústria FV, sendo que a maioria dos grandes players tem origem da indústria eletrônica, como por exemplo, Sharp, Sanyo, Mitsubishi Electric, Canon, Matsushita Ecology systems (MARINOVA; BALAGUER, 2005).

Este fato reforça o papel das firmas como unidades básicas dos sistemas setoriais de inovação FV, e seu desempenho é a principal explicação para a dinâmica da evolução tecnológica. Neste caso, quando analisamos as dez maiores empresas produtoras células FV, percebemos que embora até há poucos anos, o mercado fosse dominado pela BP Solar, uma subsidiária de uma empresa petrolífera multinacional, esta situação mudou radicalmente com a entrada de empresas japonesas e européias.

Gráfico 7 – Divisão da produção global de células FV por empresas



Fonte: EPIA (2008c, p. 27).

Mais recentemente, a empresa líder na produção de células foi a japonesa Sharp, no entanto, em 2007, essa empresa continuou a perder quota de mercado em relação aos seus concorrentes, em particular a alemã Q-Cells e Solarworld e a chinesa Suntech.

Diante da importância das firmas no ambiente do sistema setorial um desafio para empresas é coincidir a abertura de novas capacidades de produção com demanda esperada. Nessa indústria os investidores precisam de um horizonte de planejamento que vai além dos cinco a sete anos de uma fábrica típica. Portanto, muitas empresas menores foram viabilizadas com investimento públicos, muitas vezes por meio de fundos de investimentos verdes e a relativa estabilidade dos sistemas, como as tarifas *feed-in* alemãs, revelou-se crucial para as empresas (EPIA, 2008c, p. 27).

A proposição de um adequado SSI para desenvolvimento das tecnologias FV coaduna com o quadro analítico proposto por Malerba (1999 e 2003), ao afirmar que a propensão para inovar de um setor exige a coordenação das dimensões “conhecimentos e domínio tecnológico”, “atores e redes” e “instituições”. Em outras palavras seria difícil conceber um SSI inovador, se sua força se basasse apenas em uma ou duas dimensões e os grandes sistemas de inovação FV sugerem a existência de uma combinação favorável de todos esses fatores. A presente proposta para um sistema setorial FV interpreta o funcionamento destas dimensões como segue:

A dimensão “conhecimento e domínio tecnológico” consiste no domínio de uma parcela cada vez maior da cadeia produtiva, o que na Alemanha consistiu na integração vertical da indústria FV a partir de matérias primas para o módulo de fabricação, garantindo a redução da incerteza presente neste setor, uma maior segurança sobre as flutuações dos mercados e o controle dos segmentos com alto valor agregado que pudesse ter um impacto fundamental na estrutura de custos de toda a indústria.

Já a dimensão “atores e redes” deve influenciar o processo de inovação garantindo a difusão de novos conhecimentos entre agentes que estão ligados de diversas maneiras através do mercado e das relações de mercado e que sofrem dificuldades específicas de processos de aprendizagem. Para tanto, é preciso que organizações e empresas participem de cooperações em projetos de P&D e o controle descentralizado de projetos de inovação utilizando uma abordagem em rede deva interligar institutos de pesquisa de líderes, empresas privadas e outras organizações por meio de programas de transferência de tecnologia.

Na dimensão “instituição” a contribuição fundamental está manter o processo de difusão da nova tecnologia FV, tendo em vista que a interação entre os diversos agentes é moldada por instituições por meio de normas, rotinas, hábitos comuns, praticas estabelecidas, regras, leis. Outro papel crucial das instituições são mecanismos de financiamento como as tarifas *feed-in* que reduzem incertezas e estabilizam os sistemas. Entre outros papéis das instituições destaca-se financiar programas de P&D&I para ganhos de competitividade; estreitar o relacionamento entre as firmas e centros de P&D&I; coordenar atividades de P&D&I por meio de uma rede de informações; formar recursos humanos qualificados; e estabelecer cooperação internacional.

O inter-relacionamento efetivo destas dimensões constitui a proposta setorial mais consistente para o desempenho inovativo da tecnologia FV, tendo como grande diferencial analítico a ênfase no domínio tecnológico da cadeia produtiva, o reforço do papel das firmas como unidades básicas dos sistemas de inovação, sem destacar o papel preponderante das instituições deste setor na manutenção do processo de difusão da tecnologia FV.

### **3.3 Ameaças e oportunidades para energia FV no Brasil**

Apesar de notáveis esforços em algumas fontes renováveis de energia, são poucos os resultados que promovam a inserção da energia FV na matriz elétrica nacional, fazendo com que o país não disponha de mecanismos institucionais para o desenvolvimento de um mercado de energia solar FV.

O Proinfa<sup>70</sup>, principal programa federal de incentivo a promoção de fontes alternativas de energia elétrica, não contemplou a possibilidade de financiar a geração da energia FV, sendo que as iniciativas do Estado são importantes tanto para a pesquisa e desenvolvimento, quanto para subsidiar os custos iniciais de produção.

---

<sup>70</sup> Promulgada através da Lei 10762, de 11 de novembro de 2003, o Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) objetiva financiar, com suporte do BNDES, projetos de geração de energias a partir dos ventos (eólica), pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e bagaço da cana, casca de arroz, cavaco de madeira e biogás de lixo (biomassa).

Recentemente, iniciativas tentam romper este estado inercial e segundo estudo prospectivo em energia solar FV no Brasil para 2025 desenvolvido pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, o Estado brasileiro encontra-se em fase de posicionamento sobre a definição de políticas públicas de incentivo ou regulamentação que promovam a inserção dessa fonte de energia nas redes concessionárias de eletrificação rural e urbana. As principais propostas do estudo em questão, visando sustentabilidade e competitividade do setor FV brasileiro, podem ser agregadas nas seguintes linhas centrais, complementares entre si, a saber: o incentivo à pesquisa e à inovação tecnológica; a criação de um mercado consumidor; o estabelecimento de indústria de células solares e de módulos FV; e o estabelecimento de uma indústria de silício grau solar e eletrônico.

Considerando que a estrutura da cadeia produtiva da energia FV pode ser dividida em cinco partes principais, que desempenham diferentes funções e relacionam diferentes sistemas tecnológicos e cada elo desta cadeia resultando em diferentes produtos, as oportunidades brasileiras podem ser vistas no esquema que segue:

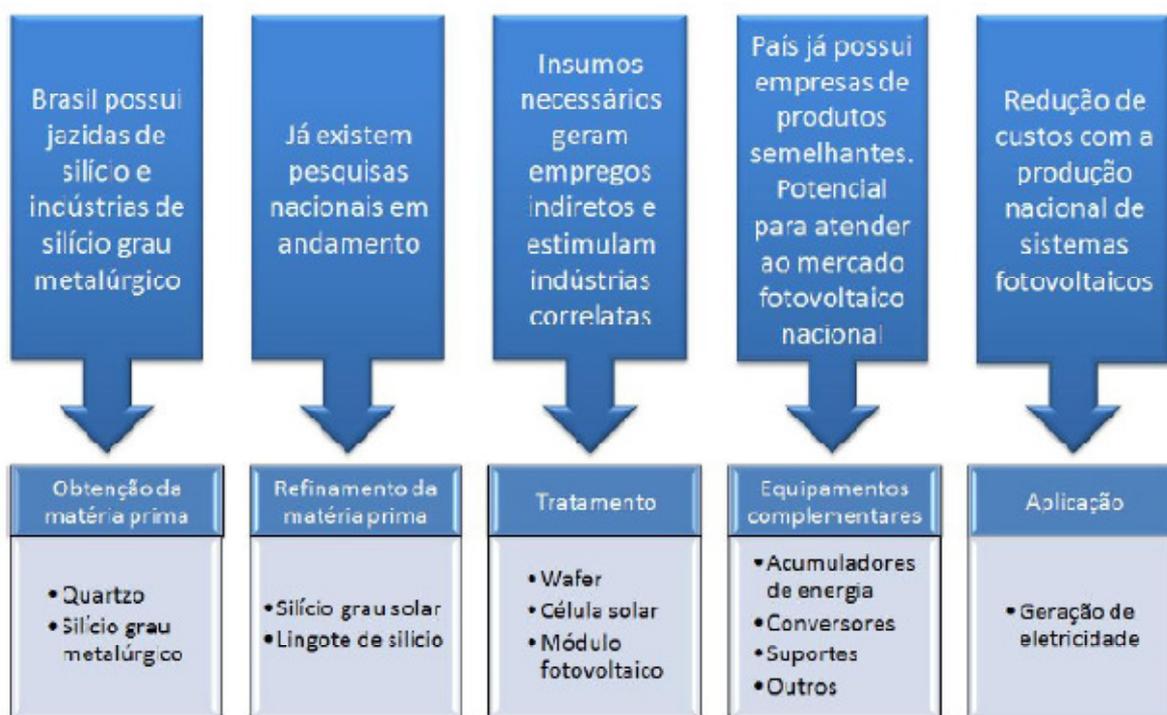


Figura 10 – Oportunidades brasileiras na cadeia produtiva da energia FV  
Fonte: CGEE, 2009.

A partir deste quadro, a identificação dos principais pontos fortes abrangidos pelas fronteiras iniciais do estudo, para atuação sustentável do País na geração de energia FV, é o fato do Brasil possuir uma das maiores reservas de quartzo para produção de silício grau solar; o potencial de insolação territorial brasileiro é elevado, se comparado aos países que atualmente lideram a produção FV; a existência de instituições de P&D nacionais que podem dar contribuições significativas à cadeia produtiva de energia FV<sup>71</sup>; os sistemas autônomos brasileiros são econômicos, se comparados aos custos da eletrificação convencional estendido a longas distâncias; a existência de importante mercado de equipamentos para o Brasil em se tratando de desenvolvimentos para sistemas autônomos ou mesmo os conectados à rede; e a existência de interesses de grupos industriais no Brasil atuantes em: comercialização do silício grau solar; comercialização de lâminas (*wafers*); comercialização de sistemas FV completos; e, usina geradora de energia FV.

Do outro lado são pontos fracos o fato do Brasil ainda não dispor de uma indústria de silício grau solar; o processo de *scale-up* da P&D para a venda de tecnologias não é setorialmente dominado no Brasil; a importação de insumos e produtos químicos é um processo demorado, complexo, e que atrasa o ciclo de desenvolvimento de tecnologias comerciais; a logística para eletrificação FV rural do Programa Luz para Todos é antieconômica para as concessionárias; não existe infraestrutura de produção de equipamentos nacionais que atenda ao mercado; os grupos de P&D estão muito focados apenas no material e não há no Brasil um laboratório que faça a caracterização elétrica e micro estrutural completa do silício; existe grave escassez de engenheiros, químicos, biólogos, e de uma série de outras especialidades necessárias ao empreendimento FV; a manutenção da idéia de que os sistemas interligados à rede são tecnologias emergentes e caras e que não temos necessidade dela ainda no sistema elétrico brasileiro; as empresas investidoras em FV, que trabalham com sistemas conectados à rede, esbarram na falta de regulamentação no Brasil; e o desenvolvimento de baterias e células FV requer volumosos investimentos.

---

<sup>71</sup> Principalmente CB-SOLAR, LABSOLAR, CETEC, CETEM, IME, INMETRO e INPI.

Mesmo que a energia solar FV conectada à rede elétrica no Brasil seja compreendida como uma fonte complementar de energia, uma vez que se trata de fonte intermitente, seu potencial é muitas vezes superior à demanda de energia ativa e futura do país, razão pela qual os sistemas FV devem ser incentivados a participar com frações crescentes de contribuição na matriz energética nacional.

Os estudos de Salamoni e Ruther (2007), afirmam que a localização geográfica brasileira é estrategicamente privilegiada no acesso a fonte de energia FV, pois o país está localizado numa faixa de latitude na qual a incidência de radiação solar é muito superior à verificada no restante do mundo. A região mais favorecida em termos de radiação solar na Alemanha apresenta aproximadamente 1,4 vezes menos radiação do que a região menos ensolarada do Brasil. Essa característica coloca o país em vantagem competitiva com relação aos países industrializados no que tange à utilização dessa fonte de energia.

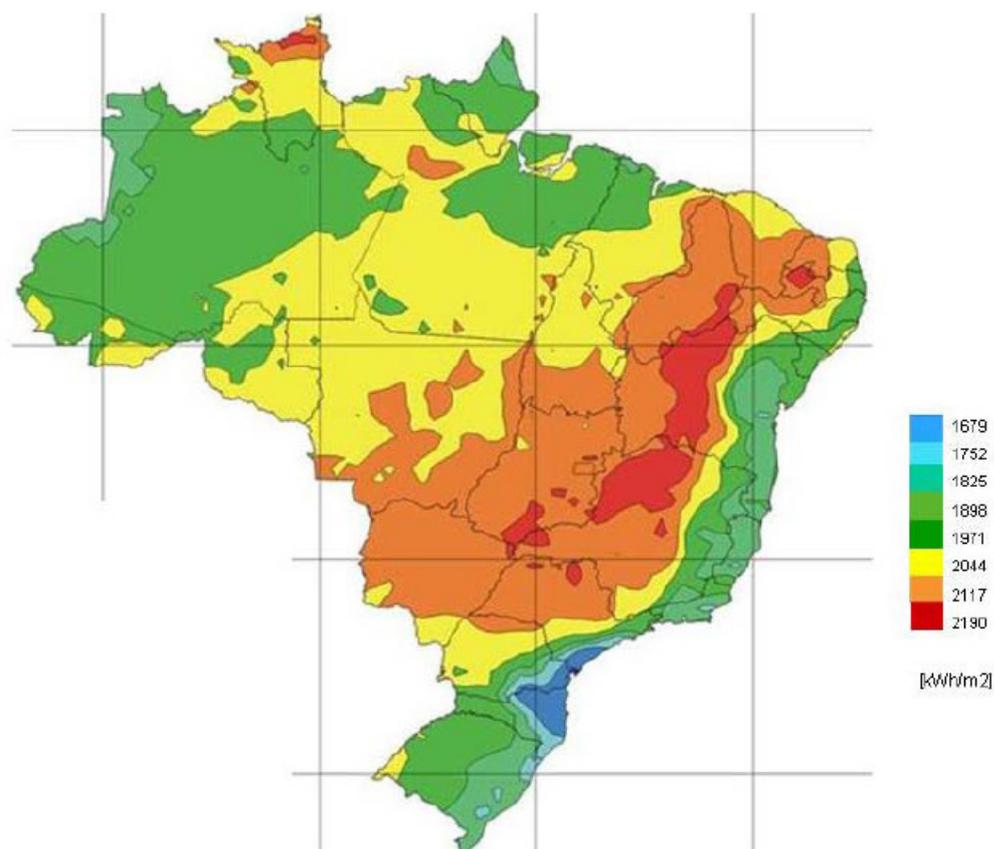


Figura 11 – Mapa de irradiação solar do Brasil para o plano inclinado.  
**Fonte:** Atlas Brasileira de Energia Solar (2006) apud Salamoni (2009, p. 86)

A partir do estudo das principais experiências desenvolvido até aqui, concluímos que o desenvolvimento da energia FV é peculiar e não ocorrerá pelas vias formais de incentivo fiscal e financeiro. Um desafio para trabalhos correlatos será o entendimento das práticas internacionais aqui relatadas à luz das particularidades brasileiras, que inovem os mecanismos tarifários existentes e sua relação com as demais fontes de energia.

Sobre esse desafio o trabalho de Salamoni (2009, p. 144-147) que propõe diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração FV conectada à rede elétrica de um programa residencial de telhados solares para o Brasil, apresenta o excelente potencial brasileiro para a aplicação da energia FV e ressalta a importância de quebrar o paradigma de que energia FV é viável apenas para os países industrializados. Nesse mesmo trabalho é proposta a elaboração de um programa residencial de incentivo baseado no mecanismo de sistema de preços (*Feed-in Law*), semelhante ao modelo alemão, mas com adaptações que considerem as especificidades da realidade brasileira. O objetivo desse programa seria o de levar a produção em economia de escala, reduzir custos e viabilizar a inserção de sistemas FV conectados à rede elétrica.

As falhas de outros programas de incentivo às FRE no Brasil resultam na falta de confiança por parte dos investidores, sentimento compartilhado por parte da população com relação aos benefícios reais da sua utilização. Com base nas demais experiências analisadas são necessárias consideráveis mudanças no mercado energético para que FRE como a energia FV possam ser introduzidas na matriz energética nacional, sendo que a eficiência das políticas governamentais depende de como elas são concebidas e de como elas são suportadas por leis específicas<sup>72</sup> (SALAMONI, 2009, p. 144-147).

A existência de esforços em algumas fontes renováveis de energia é pouco para prover resultados que promovam a inserção da energia FV na matriz elétrica nacional. O

---

<sup>72</sup> Como sistema de preços tem adquirido confiabilidade a nível mundial, bancos e outras instituições financeiras estão provendo o capital necessário para os investimentos. Para seu sucesso é importante que as tarifas prêmio sejam altas o suficiente para cobrir os custos da geração e assim, atrair os investidores.

ingresso do País no mercado de energia FV objetiva garantir seu espaço estratégico no aproveitamento da ampla gama de oportunidades geradas pela próxima onda longa de desenvolvimento do capitalismo baseado em baixas emissões de carbono. Para esse objetivo o país não poderá se ausentar dos investimentos significativos em pesquisa tecnológica e desenvolvimento industrial, a exemplo de China, Alemanha, Espanha, EUA, Japão, Índia e outros.

Com intuito de contribuir para o debate nacional, a análise do sistema capaz de coordenar essas iniciativas com vistas ao melhor desempenho inovativo, afirma que os SSI analisados são experiências fundamentais para uma concepção de modelo que promova inovações requeridas para sistemas FV. Com base no estudo prospectivo da CGEE (2009), os desafios para incentivos à pesquisa e à inovação tecnológica da energia FV no Brasil consistem em:

- a) Financiar programas de P&D&I que possibilitem ganhos de competitividade;
- b) Estreitar o relacionamento entre a indústria e centros de P&D&I;
- c) Coordenar atividades de P&D&I através de uma rede de informações;
- d) Modernizar laboratórios e estabelecer processos-piloto;
- e) Formar recursos humanos qualificados;
- f) Estabelecer cooperação internacional.

As conclusões são que o SSI proposto para o desenvolvimento de tecnologias FV exige uma mudança considerável da ênfase na elaboração de políticas de inovação, pois são mais amplas que as tradicionais políticas de C&T&I. Nesse sentido a perspectiva setorial de Malerba (2003, p. 367-368) constitui um instrumento para que formuladores de políticas públicas possam compreender as diferenças nos sistemas de inovação e para a identificação dos atores que devem ser influenciados pela política, tendo em vista que uma abordagem da política de inovação que não seja sensível às distinções setoriais importantes da tecnologia FV pode não ser a mais eficiente no tempo e nível de abrangência requerido.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta Dissertação procurou compreender quais as condições para que a energia FV contribua com o processo de transição para uma economia de baixo carbono.

Como foi analisado, o consumo de energia ocupa uma posição de destaque na promoção do desenvolvimento econômico por proporcionar uma ampla gama de oportunidades para a melhoria da qualidade de vida e o bem estar da sociedade. Contudo, o diagnóstico da estrutura da demanda energética mundial revela a sua alta dependência de recursos não renováveis de energia, que repercute em diversas externalidades negativas ao meio ambiente.

Esse problema é ainda mais agravante quando percebe-se a pressão sobre o consumo de energia dada a evolução populacional e o aumento da demanda energética de países em desenvolvimento como Brasil, Índia, China, Rússia e África do Sul, que ainda não possuem sistemas energéticos capazes de reduzir as emissões totais de carbono resultante da sua atividade econômica.

Esse contexto revelou a importância da energia FV e do conjunto de demais FRE, que tendem a substituir gradativamente os combustíveis fósseis em suas aplicações, mitigando os riscos de abastecimento e reduzindo os impactos do crescimento econômico sobre o meio ambiente.

Diante do cenário de necessidade de desenvolvimento e grande demanda energética, questiona-se se substituir a forma do recurso energético usado no crescimento é suficiente para se alcançar um modelo de desenvolvimento sustentável. Nessa questão, acredita-se ser igualmente necessária a aceitação de um novo estilo de vida por parte da sociedade para um novo modelo de desenvolvimento.

Ao mesmo tempo a aceitação de um novo estilo de vida por parte da sociedade não interrompe o processo de transição ao baixo carbono, que acredita-se ser guiado por outras motivações, como a crescente preocupação com a segurança energética dos países; uma maior conscientização sobre os impactos da produção de energia,

principalmente os efeitos na mudança do clima; a finitude da atual base energética mundial; e a geração de oportunidades de mercado.

Do conjunto de tecnologias que já contribuem para o processo de transição ao baixo carbono, a energia solar FV se destaca dado seu potencial de abatimento e pela ampla gama de possibilidades de aplicações a partir de inovações tecnológicas, em diversos tamanhos e escalas. Entretanto, essas possibilidades têm como principal barreira os limites de custo e eficiência dos sistemas, que segundo as experiências em curso estão sendo transpostas com ganhos de escala resultantes da sua difusão.

Essas experiências mostram que, apesar da existência de barreiras financeiras à adoção de fontes renováveis de energia, o uso de FV é plenamente viável com a criação de programas bem estruturados de incentivos governamentais, considerando que sua concepção exige uma mudança radical na forma de gerar, distribuir e consumir energia. Esses esforços têm se materializado em ações práticas de eliminação gradual das fontes poluidoras e não sustentáveis de energias, na implementação de constantes soluções renováveis e na desvinculação gradual do crescimento econômico do consumo de energia intensiva em carbono.

O fato comum dos casos analisados é o resultado satisfatório das leis de incentivo, como as *feed-in tariffs*, que têm se transformado no principal mecanismo de desenvolvimento de tecnologias para geração de energia FV na Europa, especialmente a interligada à rede elétrica. O estabelecimento de uma tarifa que a concessionária de distribuição de energia elétrica pague por cada kWh de energia produzida, é capaz de suportar grandes mercados de energia FV a um custo que acaba sendo distribuído entre todos os consumidores de eletricidade.

O alcance destes resultados na tecnologia FV exige o provimento de mudanças, seja pela rápida difusão das tecnologias existentes, ou por meio de atividades inovadoras que desenvolvam novas tecnologias. Nesse cenário o papel do governo é preponderante ao impedir o aprisionamento *lock-in* nas alternativas disponíveis e que apenas o ambiente do mercado seja o responsável pela determinação das inovações que serão difundidas.

Além da função preponderante exercida pelo governo, nossa proposta de análise setorial incluiu um conjunto maior de atores, pois entende-se que o direcionamento das inovações exige uma abordagem sistêmica. Desta forma, a busca por um tratamento setorial do sistema de inovação, procurou proporcionar um refinamento das noções de SNI com a finalidade básica de melhor compreender a estrutura setorial, os limites e transformações dos agentes e suas interações.

A partir desta perspectiva, concluí-se que conquistar e manter uma participação competitiva na produção de células FV exige um sistema de inovação capaz de garantir à indústria o suprimento de ganhos de eficiência na produção e a queda dos custos de produção de materiais FV com aumento na escala de produção.

Nesse sistema, a geração e adoção de novas tecnologias e a organização da inovação e da produção no nível setorial são afetadas por três dimensões distintas, porém complementares, quais sejam: conhecimento e domínio tecnológico, atores e redes e instituições.

Com o conhecimento e o domínio tecnológico busca-se o domínio de uma parcela cada vez maior da cadeia produtiva, no intuito de garantir a redução da incerteza presente neste setor, e o controle dos segmentos com alto valor agregado que possam ter um impacto fundamental na estrutura de custos de toda a indústria. Os atores e redes atuam na função principal de influenciar os processos de inovação garantindo a difusão de novos conhecimentos numa rede que interligue institutos de pesquisa, empresas privadas e outras organizações através de programas de transferência de tecnologia. Como a interação entre os diversos agentes é moldada por diferentes normas, rotinas, hábitos, práticas, regras e leis, as instituições atuam na manutenção do processo de difusão da nova tecnologia.

O conjunto destas dimensões constitui a proposta de Sistema Setorial de Inovação que considera a energia FV como importante elemento da transição tecnológica para uma economia de baixo carbono, capaz de reduzir externalidades negativas ao meio ambiente e proporcionar maior sustentabilidade do desenvolvimento econômico.

## REFERÊNCIAS

BAKER, Erin; CHON, Haewon, KEISLER, Jeffrey. **Advanced solar R&D: Combining economic analysis with expert elicitations to inform climate policy.** Energy Economics (2008), doi:10.1016/j.eneco.2007.10.008.

BHANDARI, Ramchandra; STADLER, Ingo. **Grid parity analysis of solar photovoltaic systems in Germany using experience curves.** Solar Energy (2009), 139TT:10.1016/j.solener.2009.06.001.

BOULDING, Kenneth Ewart. **The economics of the coming spaceship Earth**, in H. Jarrett (ed.) Environmental Quality in a Growing Economy, Baltimore: John Hopkins Press, 1966.

BRAGATO, Cláudia Guio. **Geração energética e processos tecnológicos sustentáveis: impasses e alternativas para o Brasil.** Dissertação (Mestrado em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

BRITO, Mikely Pereira. **Geração distribuída: critérios e impactos na rede elétrica.** Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Energia solar princípios e aplicações.** Disponível em: <139TTP://www.cresesb.cepel.br/>. Acesso em 8 de dezembro de 2008.

CGEE. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil:** Documento propositivo de ações para políticas públicas. Brasília, DF: CGEE, 2009.

COHEN, Claude Adélia Moema Jeanne. **Padrões de consumo: desenvolvimento, meio ambiente e energia no Brasil.** Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

COMMISSION ON THE MEASUREMENT OF ECONOMIC PERFORMANCE AND SOCIAL PROGRESS (CMEPSP). **Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress.** September, 2009, 291 p. Disponível em: <www.stiglitz-sen-fitoussi.fr>. Acesso em: 10 de novembro de 2008.

COSTA, Claudia do Valle. **Políticas de promoção de fontes novas e renováveis para geração de energia elétrica:** lições da experiência europeia para o caso

brasileiro. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

COSTA, Ricardo Cunha da e PRATES, Cláudia Pimentel T. **O Papel das Fontes Renováveis de Energia no Desenvolvimento do Setor Energético e Barreiras à sua Penetração no Mercado**. BNDES Setorial. Rio de Janeiro. Nº 21, p. 5-30, março 2005.

COSTA, Wagner Teixeira da. **Controlador Preditivo para MPPT de Sistemas Fotovoltaicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, iniciado em 2004.

DALCOMUNI, Sonia Maria. **Dynamic capabilities for cleaner production innovation: the case of the market export pulp in Brazil**. Tese (Doutorado em Economia) – University of Sussex, UK, 1997.

\_\_\_\_\_. Sistemas Setoriais de Inovação: abordagem tecnológica da firma numa perspectiva evolucionista. In: **Revista Perspectiva Econômica**. Ano II. V. 1. N. 1. Vitória: Edufes, 2001. P. 197-224.

\_\_\_\_\_. Nanotecnologia, inovação e economia. In: MARTINS, Paulo Roberto (Org.). **Nanotecnologia, sociedade e meio ambiente**. Primeiro seminário internacional. São Paulo: Associação Editorial Humanitas, 2005. P. 85-148.

\_\_\_\_\_. Nanotecnologia, inovação e economia: inter-relações fundamentais para o desenvolvimento sustentável. In: MARTINS, Paulo Roberto (Org.). **Nanotecnologia, sociedade e meio ambiente**. Trabalhos apresentados no segundo seminário internacional. São Paulo: Xamã VM Editora e Gráfica Ltda, 2006.

DALY, Herman E. **The Economics of the Steady State**. The American Economic Review, Vol. 64, No. 2, Papers and Proceedings of the Eighty-sixth Annual Meeting of the American Economic Association, 1974, p. 15-21.

\_\_\_\_\_. **Steady-State Economics: A New Paradigm**. New Literary History, Vol. 24, No. 4, Papers from the Commonwealth Center for Literary and Cultural Change, Autumn, 1993. P. 811-816.

DHARMADASA, I. M. **Solar Energy Technologies: A Status Report**. 2009. Disponível em: <140TTP://www.apsl.org.uk/>. Acesso em: 15 de outubro de 2009.

DOSI, Giovanni. **Technical Change and Industrial Transformation**: The Theory and an Application to the Semiconductor Industry. London: The Macmillan Press LTD, 1984 .

EPIA. **Supporting Solar Photovoltaic Electricity**: An Argument for Feed-in Tariffs. Bélgica: EPIA, 2008<sup>a</sup>. Disponível em: <141TTP://www.epia.org>. Acesso em: 11 julho de 2009.

\_\_\_\_\_. **Building Integrated Photovoltaics**: a new design opportunity for architects. Bélgica: EPIA, 2008b. Disponível em: <141TTP://www.epia.org>. Acesso em: 11 de julho de 2009.

\_\_\_\_\_. **Solar Generation V**: Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020. Bélgica: EPIA, 2008c. Disponível em: <141TTP://www.epia.org>. Acesso em: 11 de julho de 2009.

\_\_\_\_\_. **Global market Outlook for photovoltaics until 2013**. Bélgica: EPIA, 2009. Disponível em: <141TTP://www.epia.org>. Acesso em: 11 de julho de 2009.

EUROSERV'ER. **Photovoltaic Barometer**. Systèmes Solaires 141T journal 141T photovoltaïque. N° 1 – 2009. Disponível em: <141TTP:// www.euroserv-er.org/>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2010.

FEITOSA, Paulo Henrique Assis. **Energia solar no Brasil**. Jornal Valor Econômico, São Paulo, ano 10, n°. 2471, p. A12, 2010.

FEITOSA, Paulo Henrique Assis; DALCOMUNI, Sonia Maria. **Estratégias nacionais para o desenvolvimento sustentável a partir da promoção de fontes renováveis de energia**: o caso solar fotovoltaico. In: VIII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2009, Cuiabá-MT. Anais do VIII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2009.

FONTOURA, Patrick Freitas. **A Qualidade no Fornecimento de Energia Elétrica por meio de Sistemas Fotovoltaicos no Processo de Universalização dos Serviços de Energia**. Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria de Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Salvador, Salvador, 2002.

FRAIDENRAICH, Naum. **Tecnologia Solar no Brasil**. Os próximos 20 anos. Disponível em: <141TTP://www.cgu.unicamp.br>. Acesso em: 10 de novembro de 2008.

FREEMAN, Chris and SOETE, Luc. **The economics of industrial innovation**. Third

Edition. First Edited by Penguin Books, 1974. London: Pinter, 1997.

FREEMAN, Chris. **Technology policy and economic performance: lessons from Japan**. Londres: Pinter, 1987.

\_\_\_\_\_. **The Greening of Technology and Models of Innovation**. Technological Forecasting and Social Change. Volume 53, Number 1, September 1996, 142T. 27-39 (13).

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. **Energy and economic myths**. Southern Economic Journal. 41, n.º 3, January 1975.

\_\_\_\_\_. **The Entropy law and the economic process in retrospect**. Estern Economic Journal. Volume XII, n.º. I, January-march 1986.

\_\_\_\_\_. **The Entropy law and the economic process**. Cambridge, Mass: Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1999.

GREENPEACE. **A Caminho da Sustentabilidade Energética: Como Desenvolver um Mercado de Renováveis no Brasil**. Disponível em: <142TTP://www.greenpeace.org>. Acesso em 22 de novembro de 2008.

HARDIN, Garrett. **The Tragedy of the Commons**. Science 13, vol. 162, n.º. 3859, 1968, p. 1243-1248. Disponível em: < 142TTP://www.sciencemag.org/>. Acesso em: 6 de janeiro de 2010.

HUETING, Roefie. **Why environmental sustainability can most probably not be attained with growing production**. Journal of Cleaner Production. N.º. 18, 2010, p. 525–530.

IEA. **Experience Curves for Energy Technology Policy**. Paris, France, 2000. Disponível em: <142TTP://www.iea.org>. Acesso em: 15 de novembro de 2008.

\_\_\_\_\_. **World Energy Outlook**. Paris, France, 2007. Disponível em: <142TTP://www.iea.org>. Acesso em: 12 junho de 2009.

\_\_\_\_\_. **World Energy Outlook**. Paris, France, 2009. Disponível em: <142TTP://www.iea.org>. Acesso em: 13 de janeiro de 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Disponível em: <142TTP://www.ipcc.ch>. Acesso em: 14 de setembro de 2010.

JACOBSSON, Staffan e BERGEK, Anna. **Transforming the energy sector: the**

evolution of technological systems in renewable energy technology. *Industrial and Corporate Change*, Vol. 13, nº. 5, p. 815–849.

JÄGER-WALDAU, Arnulf. **R&D roadmap for PV**. *Thin Solid Films*, nº. 451 –452, 2004, p. 448–454.

KAMP, Linda Manon. Et al. **The functioning of photovoltaic technological innovation systems**: a comparison between Japan and the Netherlands. In: Summer Conference 2009, Dinamarca: CBS – Copenhagen Business School, 2009. Disponível em: <<http://www2.druid.dk/>>. Acesso em: 8 de abril de 2010.

KEMP, René e ROTMANS, Jan. **Transitioning policy**: co-production of a new strategic framework for energy innovation policy in the Netherlands. *Policy Sci*, nº 42, 2009, p. 303–322. Disponível em: <[143TTP://www.mckinsey.com/](http://www.mckinsey.com/)>. Acesso em: 11 de setembro de 2009.

KEMP, René. The transition from hydrocarbons. The issues for policy, in: S. Faucheux, D. Pearce and J.L.R. Proops (eds.), **Models of Sustainable Development**, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, 1996, p. 151-175.

KERN, Florian; SMITH Adrian. **Restructuring energy systems for sustainability?** Energy transition policy in the Netherlands. *Energy Policy*, nº. 36, 2008, p. 4093–4103.

KUHN, Thomas Samuel. **A estrutura das revoluções científicas**. 6. Ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 2001.

KURZWEIL, Ray. **Solução a vista**: o ritmo acelerado dos avanços da tecnologia da informação permitirá resolver em duas décadas problemas como o aquecimento global; os painéis de energia solar custarão apenas um centavo de dólar por metro quadrado. HSM Management, São Paulo, ano 11, v. 4, p. 84-86, 2007.

LANDES, David S. **Prometeu desacorrentado**: transformação tecnológica e desenvolvimento industrial na Europa ocidental, desde 1750 até a nossa época. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1994.

LUNDVALL, Bengt-Ake. **National systems of innovation**: towards a theory of innovation and interactive learning. London and New York: Pinter, 1992.

MALERBA, Franco. **Sectoral systems of innovation and production**. TSER ESSY Project (Sectoral systems in Europe: innovation, competitiveness and growth) – DRUID Conference, 1999.

\_\_\_\_\_. **Sectoral systems and innovation and technology policy.** Revista Brasileira de Inovação, v.2, n.2, 2003, p.329-375.

MARIGO, N. FOXON, T.J. PEARSON, P.J. **Comparing innovation systems for solar photovoltaics in the United Kingdom and in China.** [S.l.]. Londres: Imperial Centre for Energy Policy and Technology (ICEPT), 2009. Disponível em: <<http://dspace-unipr.cilea.it/>>. Acesso em 20 abr. 2010.

MARINOVA, Dora; BALAGUER, Antonio. **Transformation in the photovoltaics industry in Australia, Germany and Japan:** Comparison of actors, knowledge, institutions and markets. Energy Policy, Volume 33, Issue 16, 2005, p. 2123-2137.

MARKANDYA, A. and RICHARDSON, J. (eds.). **The earthscan reader in environmental economics.** Earthscan Publications Ltda. London, 1992.

MARKANDYA, Anil; PEDROSO-GALINATO, Suzette; STREIMIKIENE, Dalia. **Energy intensity in transition economies:** Is there convergence towards the EU average?. Energy Economics, nº. 28, 2006, p. 121–145.

MAY, Peter H. e LUSTOSA, Maria Cecília e Vinha, Valéria da. **Economia do Meio Ambiente:** teoria e prática. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

MCKINSEY & COMPANY. **Pathways to a Low-Carbon Economy:** version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve. Disponível em: <<http://www.mckinsey.com/>>. Acesso em: 11 de setembro de 2009.

MEADOWCROFT, James. **What about the politics?** Sustainable development, transition management, and long term energy transitions. Policy Sci, nº 42, 2009, p. 323–340.

METCALFE, Stan. **Evolutionary Economics and Technology Policy.** The Economic Journal, Vol. 104, nº. 425, Jul., 1994, p. 931-944

MOTTA, Ronaldo Seroa da. **Economia ambiental.** Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.

NELSON, R. R. e WINTER, S. G. **An evolutionary theory of economic change.** Estados Unidos: Harvard College, 1982.

NILL, Jan; KEMP, René. **Evolutionary approaches for sustainable innovation policies:** From niche to paradigm?. Research Policy. Nº. 38, 2009, pp. 668-680 (13).

PEARCE D., MARKANDYA A., BARBIER E. B. **Blueprint for a Green Economy.**

**London:** Earthscan Publications Ltd, 1989.

\_\_\_\_\_. **Sustainable Development:** Economics and environment in the third world. London: Earthscan Publications Ltd, 1994.

PINTO JR., H.Q., CASTRO, P. **As Políticas de Promoção de Fontes Renováveis de Energia:** uma Análise das Experiências Alemã e Espanhola, in Boletim Infopetro Petróleo & Gás Brasil, julho/agosto 2007, ano 8, no. 04, 2007, pp. 4-10.

PINTO JUNIOR, Helder Queiroz. **Economia da Energia:** fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

POPONI, Daniele. **Analysis of diffusion paths for photovoltaic technology based on experience curves.** Solar Energy, nº. 74, 2003, p. 331–340.

PVPS. **Photovoltaic Power Systems Programme:** Annual Report 2008. Paris: IEA-PVPS, 2009. Disponível em: <<http://www.iea-pvps.org>>. Acesso em: 5 novembro de 2009.

\_\_\_\_\_. **Trends In Photovoltaic Applications:** Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2007. Paris: IEA-PVPS, 2008. Disponível em: <<http://www.iea-pvps.org>>. Acesso em: 12 de julho de 2009.

\_\_\_\_\_. **Trends In Photovoltaic Applications:** Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2008. Paris: IEA-PVPS, 2009. Disponível em: <<http://www.iea.org>>. Acesso em: 2 de outubro de 2009.

PVRESOURCES. **Large-Scale Photovoltaic Power Plants. Annual and cumulative installed power out put capacity.** Annual Review 2008. Disponível em: <<http://www.pvsources.com> />. Acesso em: 16 de setembro de 2009.

RIVERS, Nic e JACCARD, Mark. **Choice of environmental policy in the presence of learning by doing.** Energy Economics, nº. 28, 2006, p. 223–242.

RODRÍGUEZ, Carlos Roberto Cervantes. **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída:** o Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Programa de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ROSENBERG, Nath. **Inside the black box:** technology and economics. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2000.

SALAMONI, I. T.; RUTHER, R. **O Potencial Brasileiro da Geração Solar Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica**: Análise de Paridade de Rede. In: IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto/MG. Anais do ENCAC 2007, p. 1658-1667.

SALAMONI, Isabel Tourinho. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil**: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SANTOS, Andrea Souza. **Desafios Pós-Kyoto para o Desenvolvimento**. Trabalho apresentado no VIII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, Cuiabá, 2009.

SCHNEIDER, François; KALLIS, Giorgos; MARTINEZ-ALIER, Joan. **Crisis or opportunity? Economic degrowth for social equity and ecological sustainability**. Introduction to this special issue. *Journal of Cleaner Production*. n.º 18, 2010, p. 511–518.

SCHUMPETER, Joseph. **Capitalismo, Socialismo e Democracia**. Rio de Janeiro: Zahar, 1984.

SILVA, Arthur José Gerbasi da. **Investimento de empresas de petróleo em energia fotovoltaica**: o caso da BP solar e motivações da Petrobras. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SILVERBERG, Gerald; DOSI, Giovanni; ORSENIGO, Luigi. **Innovation, Diversity and Diffusion**: A Self-organisation Model. *Economic Journal*, Royal Economic Society, vol. 98, n.º. 393, 1988, p. 1032-1054.

SIMIONI, Carlos Alberto. **O Uso de Energia Renovável Sustentável na Matriz Energética Brasileira**: obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Programa de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SORRELL, Steve. **The Rebound Effect**: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency, 2007. Disponível

em: <<http://www.ukerc.ac.uk/>>. Acesso em: 12 de outubro de 2009.

TAYLOR, Margaret. *et al.* **Government Actions and Innovation in Clean Energy Technologies**: The Cases of Photovoltaic Cells, Solar Thermal Electric Power, and Solar Water Heating. CEC-500-2007-012. California Energy Commission, 2007.

VEIGA, José Eli da. **Mundo em transe**: do aquecimento global ao ecodesenvolvimento. Campinas: Editora Autores Associados LTDA, 2009.

VILLASCHI, Arlindo. **Paradigmas tecnológicos**: uma visão histórica para a transição presente. Economia. Curitiba: UFPR. n. 1 (28) v. 30. p. 65-105. jan./jun. 2004.

WATANABE, Chihiro; WAKABAYASHI, Kouji; MIYAZAWA, Toshinori. **Industrial dynamism and the creation of a “virtuous cycle” between R&D, market growth and price reduction**: The case of photovoltaic power generation (PV) development in Japan. Technovation, n.º. 20, 2000, p. 299–312.

WECK, Denise. **As lições da Alemanha**: como investimentos, inovação e políticas claras o país prova que é possível reduzir a dependência do petróleo. Exame – Estudo Especial Energia, São Paulo, ano 42, edição 927, n.º. 18, p. 14-23, 2008.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future**. 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm/>>. Acesso em: 16 de setembro de 2009.