

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**

**CENTRO DE TECNOLOGIA**

**CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**CADEIA PRODUTIVA DA ENERGIA SOLAR FOTO-  
VOLTAICA NO BRASIL: Oportunidades e desafios**

**EMERSON RANIERE DE MACEDO**

**NATAL - RN**

**2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**

**CENTRO DE TECNOLOGIA**

**CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**CADEIA PRODUTIVA DA ENERGIA SOLAR FOTO-  
VOLTAICA NO BRASIL: Oportunidades e desafios**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção, como requisito para obtenção do Título de Engenheiro de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Orientador (a): Professor Doutor Mario Orestes Aguirre González

**EMERSON RANIERE DE MACEDO**

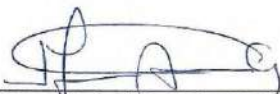
**NATAL - RN**

**2015**

**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Ao **25º dia do mês de novembro de 2015**, nas dependências da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado de **CADEIA PRODUTIVA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: uma análise exploratória**, autoria do acadêmico **Emerson Raniere De Macedo**. A Banca Examinadora foi formada pelo **Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre Gonzalez** (orientador) e os convidados **Prof. Dr. Otoniel Marcelino de Medeiros** e **Prof. Dr. Helio Roberto Hekis**. Após apresentação e arguição e tendo o aluno respondido satisfatoriamente aos questionamentos, o trabalho foi considerado Aprovado com nota final 10,0, cumprindo assim o requisito final para a conclusão do curso de Engenharia de Produção desta Universidade. Nada mais havendo a tratar, encerrou-se a presente sessão lavrando-se a presente ata.

Natal, 25/11/2015



Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre Gonzalez  
Presidente da banca



Prof. Dr. Otoniel Marcelino de Medeiros  
Membro



Prof. Dr. Helio Roberto Hekis  
Membro



Emerson Raniere De Macedo  
Acadêmico

**Reitor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte**

Prof. Dr<sup>a</sup>. Ângela Maria Paiva Cruz

**Diretor do Centro de Tecnologia**

Prof. Dr. Luiz Alessandro Pinheiro da Câmara de Queiroz

**Coordenador do Curso de Engenharia de Produção**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sandra Rufino Santos

**Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sandra Rufino Santos

**Orientação**

Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre González

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Catálogo da Publicação na Fonte

Macedo, Emerson Raniere de.

Cadeia produtiva da energia solar fotovoltaica no Brasil: oportunidades e desafios. / Emerson Raniere de Macedo. – Natal, 2015.

67 f. : il.

Orientadora: Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre González.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia da Produção.

1. Energia solar – Monografia. 2. Sistema fotovoltaico – Monografia. 3. Cadeia produtiva fotovoltaica – Monografia. I. González, Mario Orestes Aguirre. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 551.521.37

# DEDICATÓRIA

*Á Deus, à minha família e meus amigos. Em especial, à minha mãe Antônia por todo amor, compreensão e apoio sempre.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço à Deus pela oportunidade de poder ter chegado até aqui. Por ter me dado condições de poder fazer meu trabalho. Por tudo que eu aprendi e continuo a aprender. Pelas “luzes no fim do túnel” quando tudo parecia tão cansativo. Pelo pão de cada dia, sempre.

Agradeço aos meus pais, Antônia Martins de Macedo e Eliel Fernandes de Macedo, minha razão de existir.

Aos meus familiares e amigos, que sempre me apoiaram e incentivaram.

Aos meus amigos e colegas da turma 2009.2, aos agregados e aos que nos agregaram.

À Ana Beatriz Guilherme, mais que uma querida familiar ou professora: uma incentivadora e amiga.

À empresa Ambev – Companhia de bebidas das Américas, pelos conhecimentos obtidos durante meu período de estágio e amigos que lá encontrei.

Ao corpo docente e servidores da UFRN, pelos ensinamentos e empenho durante minha graduação.

Em especial, ao professor orientador Mário Orestes Gonzáles, pelas orientações e por ter acreditado em mim.

Por fim, a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para minha formação acadêmica e a realização deste trabalho.

*“Erros são, no final das contas,  
fundamentos da verdade. Se um  
homem não sabe o que uma coisa  
é, já é um avanço do conhecimento  
saber o que ela não é.”*

(Carl Jung)

## RESUMO

A utilização de fontes renováveis de geração de energia é uma tendência em todo mundo. A energia fotovoltaica é um dos exemplos: o barateamento dos custos de aquisição e instalação dos equipamentos, atrelado às políticas de incentivos e programas de financiamento, principalmente nos países desenvolvidos, têm surtido efeitos de expansão da capacidade instalada de geração de energia por irradiação solar. O Brasil, entretanto, mesmo apresentando ótimos índices de irradiação e extensão de terras disponíveis, encontra-se em situação de desvantagem. A produção fotovoltaica no país representa menos de 0,1% da matriz energética brasileira total, demonstrando o reduzido nível de desenvolvimento do setor no país. Nessa premissa, esse trabalho possui o objetivo principal de identificar a cadeia produtiva da energia fotovoltaica no Brasil, apontando os desafios e as oportunidades para o desenvolvimento e a consolidação do setor. No que diz respeito ao método de pesquisa, quanto ao objetivo, enquadra-se como exploratória, por proporcionar uma maior familiaridade com o tema e torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. Como resultados, são demonstrados: a situação atual da cadeia produtiva fotovoltaica no Brasil, o número de empresas e capacidade produtiva de cada elo. A pesquisa resulta também em uma demonstração das principais oportunidades e desafios enfrentados para o desenvolvimento do setor no país.

Palavras Chaves: cadeia produtiva, energia fotovoltaica, desenvolvimento.



## **ABSTRACT**

The use of renewable energy generation is a trend worldwide. Photovoltaics is one example: the cheapening of the acquisition and installation costs of equipment, tied to incentive policies and funding programs, especially in developed countries, have surtido effects of expanding the installed capacity of solar irradiation energy generation. The Brazil, however, even with great levels of irradiation and extension of available land is at a disadvantage. Photovoltaic production in the country is less than 0.1% of the total Brazilian energy matrix, demonstrating the low level of development of the sector in the country. This premise, this work has the main objective to identify the supply chain of photovoltaics in Brazil, pointing out the challenges and opportunities for the development and consolidation of the sector. With regard to the search method, as the objective, falls as exploratory, by providing a greater familiarity with the subject and make it more explicit or constructing hypotheses. As a result, are stated: the current situation of photovoltaic production chain in Brazil, the number of companies and productive capacity of each link. The research also results in a demonstration of the main opportunities and challenges faced in the development of the sector in the country.

Keywords: production chain, photovoltaics, development.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 EXPOSIÇÃO DO TEMA</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>13</b>
<b>1.3 OBJETIVO</b> .....	<b>14</b>
1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
<b>1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO</b> .....	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 CADEIA DE SUPRIMENTOS</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 NÍVEIS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS .....	19
2.1.2 A CADEIA DE SUPRIMENTOS COMO UMA EXPANSÃO DA GESTÃO DA PRODUÇÃO .....	19
2.1.3 CADEIA PRODUTIVA .....	20
<b>2.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO MUNDO .....	21
2.2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL .....	24
<b>2.3 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>26</b>
2.3.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	26
2.3.1.1 Módulos .....	27
2.3.1.2 Inversores .....	28
2.3.1.3 Cabos.....	28
2.3.1.4 Controladores de cargas e baterias .....	29
<b>2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS</b> .....	<b>29</b>
<b>2.5 O EFEITO FOTOVOLTAICO</b> .....	<b>30</b>
2.5.1 CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO.....	31
2.5.2 CÉLULAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO .....	31
2.5.3 CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO.....	31
2.5.4 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS.....	32
<b>CAPÍTULO 3 - CADEIA PRODUTIVA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1 A CADEIA PRODUTIVA FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>33</b>
3.1.1 PRODUÇÃO DE SILÍCIO METALÚRGICO.....	35
3.1.2 PRODUÇÃO DE SILÍCIO GRAU SOLAR .....	37
3.1.3 PRODUÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	38
3.1.4 PRODUÇÃO DE MÓDULOS E PAINÉIS SOLARES.....	40
3.1.5 PRODUÇÃO DOS DEMAIS COMPONENTES DO SISTEMA .....	43
3.1.6 EMPRESAS DE CONSULTORIA E PROJETOS E EMPRESAS ESPECIALIZADAS EM MANUTENÇÃO E CONTROLE OPERACIONAL .....	44
<b>3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A CADEIA PRODUTIVA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>45</b>
<b>CAPÍTULO 4 - A CADEIA PRODUTIVA DO SETOR FOTOVOLTAICO NO BRASIL</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1 PRODUÇÃO DE SILÍCIO METALÚRGICO</b> .....	<b>47</b>
<b>4.2 PRODUÇÃO DE SILÍCIO GRAU SOLAR</b> .....	<b>49</b>

<b>4.3</b>	<b>PRODUÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....</b>	<b>50</b>
<b>4.4</b>	<b>PRODUÇÃO DE MÓDULOS E PAINÉIS FV.....</b>	<b>51</b>
<b>4.5</b>	<b>EMPRESAS PRODUTORAS DOS DEMAIS COMPONENTES .....</b>	<b>52</b>
<b>4.6</b>	<b>EMPRESAS PRESTADORAS DE SERVIÇOS: INSTALAÇÃO E SUPORTE TÉCNICO.....</b>	<b>52</b>
<b>4.7</b>	<b>SÍNTESE DA CADEIA PRODUTIVA BRASILEIRA .....</b>	<b>53</b>
<b>CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>		<b>55</b>
<b>5.1</b>	<b>PRODUÇÃO DE SILÍCIO METALÚRGICO.....</b>	<b>55</b>
<b>5.2</b>	<b>PRODUÇÃO DE SILÍCIO GRAU SOLAR .....</b>	<b>55</b>
<b>5.3</b>	<b>PRODUÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....</b>	<b>56</b>
<b>5.4</b>	<b>PRODUÇÃO DE MÓDULOS E PAINÉIS .....</b>	<b>56</b>
<b>5.5</b>	<b>PRODUÇÃO DE INVERSORES E DEMAIS COMPONENTES .....</b>	<b>56</b>
<b>5.6</b>	<b>EMPRESAS PRESTADORAS DE SERVIÇOS: INSTALAÇÃO E SUPORTE TÉCNICO.....</b>	<b>57</b>
<b>CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>		<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>61</b>
<b>GLOSSÁRIO .....</b>		<b>67</b>

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta o contexto onde a pesquisa foi realizada. Faz uma introdução à temática, além de descrever o problema da pesquisa, objetivos, justificativa, método de pesquisa e estrutura do trabalho.

## 1.1 Exposição do tema

A geração de energia a partir de fontes renováveis passa por uma fase de crescimento e otimismo em nível mundial. A capacidade de geração de energia eólica, solar fotovoltaica e hídrica, sozinhas, aumentaram 128GW a partir de 2013. No final de 2014, as renováveis respondiam a uma estimativa de 27,7% da matriz energética mundial (REN21, 2015).

A redução dos custos de instalação, incentivos governamentais, impactos ambientais reduzidos e o fato de serem fontes inesgotáveis de energia são fatores que propulsionam estas modalidades de produção e atraem novos investidores. Em 2014, os investimentos em energias renováveis no mundo aumentaram 17% em relação a 2013, alcançando o marco de 270 bilhões de dólares investidos (MCCRONE *et al*, 2015).

A energia solar fotovoltaica merece destaque nesse cenário. Ela apresentou índices de crescimento expressivos: sua capacidade aumentou em 48 vezes entre 2004 e 2014, saindo de 3,7GW para 177GW. A produção em larga escala e o aumento da eficiência dos geradores de energia por células fotovoltaicas estão propulsionando um aumento nos investimentos e na capacidade de produção em diversos países como China, Estados Unidos e Japão (REN21, 2015).

No Brasil, embora seja ainda um setor em fase inicial de desenvolvimento, é visto com otimismo, dado o potencial energético no país, alta incidência solar e o território extenso. Estima-se que o país seja o 5º melhor em condições favoráveis à essa tecnologia. Atrelado a isso, tem-se o cenário positivo dessa tecnologia no âmbito global, com a redução dos custos de produção e viabilidade econômica da tecnologia no contexto global, que aumentam as expectativas do país no setor.

Além disso, novas políticas públicas que incentivam investimentos para gerações autônomas estão sendo desenvolvidas. A geração distribuída em pequenas quantidades, em locais como telhados residenciais, comerciais e industriais, é uma vantagem e característica da energia solar fotovoltaica e pode ser bastante explorada no mercado nacional.

Assim, existem muitas expectativas em torno dessa tecnologia no Brasil. Entretanto, a consolidação desse setor requer uma indústria estruturada, que possa dar o suporte para o crescimento da demanda e atender com qualidade e competitividade o mercado. Neste âmbito, este trabalho propõe avaliar a cadeia produtiva da energia fotovoltaica no Brasil, desde a fase de obtenção das matérias primas mais básicas até a instalação e suporte técnico das usinas fotovoltaicas, buscando encontrar as dificuldades, as principais limitações, necessidades de expansão e as oportunidades de melhorias.

## **1.2 Justificativa**

A expansão da matriz energética a partir de fontes renováveis é uma tendência mundial. Além das vantagens de ser uma energia limpa, sem emissões de gases no ambiente e de fonte inesgotável e abundante, a energia solar vem se tornando uma alternativa complementar, tornando as matrizes energéticas diversificadas e, conseqüentemente menos exposta à riscos externos.

No Brasil, o investimento nessas fontes de energia se faz ainda mais atraente devido às condições favoráveis. Em se tratando da energia solar fotovoltaica, o Brasil possui níveis de incidência solar elevados, ao comparar com países da Europa, onde a tecnologia já está em fase avançada. Com clima adequado, território nacional extenso e abundância de matéria prima específica para os geradores, o país se mostra como um forte candidato a ser uma das nações referência no assunto.

Entretanto, para que essas expectativas se concretizem, se faz necessário um setor produtivo capaz de desenvolver os produtos e equipamentos em quantidade e qualidade suficiente para atender à crescente demanda, com uma rede de suprimentos, fornecedores e produtores estruturada. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE (2015), o Brasil possui apenas empresas com capacidade técnica de produção de silício metalúrgico e montagem de módulos, empresas de projetos e suporte técnico. Todos os outros materiais presentes na cadeia nacional são importados e apresentam desafios para estabelecimento desses setores no país.

Considerando esse cenário, este projeto justifica-se por trazer uma análise da cadeia produtiva da energia solar no país, analisando a capacidade de atender as demandas atuais e futuras, principais entraves e oportunidades de melhoria na cadeia produtiva nacional, contribuindo para o desenvolvimento do setor no Brasil.

Para comunidade científica esse trabalho contribui com uma análise concentrada referente ao mercado nacional de geradores fotovoltaicos, apontando dificuldades enfrentadas pelos atuantes e sugestões de melhorias visando a consolidação do setor no país. Para as empresas, esse trabalho contribui com uma análise do cenário brasileiro, identificando os concorrentes, atuais e futuros, as oportunidades e ameaças no setor.

## **1.3 Objetivo**

Identificar a cadeia produtiva da energia fotovoltaica no Brasil, apontando os desafios e as oportunidades para o desenvolvimento e a consolidação do setor.

### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Identificar as tecnologias de geração de energia fotovoltaica existentes;
- Especificar as tecnologias de geração de energia fotovoltaica encontradas no mercado nacional;
- Especificar os componentes necessários para geração de energia fotovoltaica;
- Conhecer a cadeia produtiva genérica da tecnologia fotovoltaica;
  - Identificar os principais produtores;
  - As matérias-primas de cada etapa;
  - Identificar a origem dos equipamentos;
- Conhecer a cadeia produtiva brasileira: empresas produtoras e capacidades de produção;
- Expor os principais desafios para o desenvolvimento do setor no âmbito nacional;
- Sugerir melhorias, oportunidades de investimentos e novas pesquisas científicas.

## 1.4 Metodologia de Pesquisa

Nesse trabalho busca-se uma revisão bibliográfica sobre a teoria da geração de energia fotovoltaica, bem como as tecnologias de geração disponíveis no Brasil. Busca-se também os conceitos mais atualizados sobre Cadeia de Suprimentos e cadeia produtiva. Em um segundo momento, analisa a cadeia produtiva no país, visando encontrar os principais desafios, dificuldades e oportunidades do setor.

Assim, a abordagem científica usada para o desenvolvimento do trabalho é classificada como pesquisa exploratória. Segundo Gil (2007), este tipo de pesquisa tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. A grande maioria dessas pesquisas envolve: (a) levantamento bibliográfico; (b) entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; e (c) análise de exemplos que estimulem a compreensão do tema.

Após as etapas de levantamento bibliográfico, conhecimento das tecnologias disponíveis, os dados são analisados e discutidos a fim de apresentar um retrato do panorama atual da cadeia produtiva da energia solar no Brasil, as oportunidades encontradas no setor e as principais dificuldades para a consolidação do setor no país.

## 1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho ora apresentado é dividido em seis capítulos. O capítulo 2 aborda o referencial teórico para a pesquisa. São abordados os conceitos de cadeia de suprimentos, cadeia produtiva e uma revisão da tecnologia de geração energética por sistemas fotovoltaicos, áreas as quais o trabalho foi desenvolvido.

No capítulo 3 a cadeia produtiva da energia fotovoltaica é explorada, em um contexto geral. São abordados os processos de obtenção do sistema fotovoltaico desde a obtenção da matéria prima até as empresas prestadoras de serviços de instalação e manutenção.

O capítulo 4 apresenta os dados sobre a situação da cadeia produtiva fotovoltaica nacional, identificando as capacidades produtivas, os setores com empresas atuantes em cada elo da cadeia. Por fim, traz uma esquematização que sintetiza a cadeia produtiva brasileira.

O Capítulo 5, apresenta-se discutindo os resultados obtidos: as dificuldades e oportunidades do setor fotovoltaico brasileiro e, por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões e considerações finais do autor a respeito do tema da pesquisa.



## CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo do referencial teórico visa oferecer suporte ao objetivo desse estudo. Estrutura-se em duas seções: a primeira aborda o conceito da Cadeia de suprimentos: tipologia, área de abrangência entre outros conceitos, além de uma definição do conceito de cadeia produtiva de um produto ou serviço. A segunda seção apresenta uma introdução a respeito da situação da energia fotovoltaica no mundo e no Brasil, seu sistema de funcionamento, principais componentes e tecnologias existentes.

### 2.1 Cadeia de Suprimentos

Cadeia de suprimentos é um conjunto de funções dentro e fora de uma empresa que garantem que a cadeia de valor possa fazer e providenciar produtos e serviços aos clientes (Cox *et al.*, 1995). A qualidade de um produto, seu preço, a disponibilidade para pronta entrega e outros elementos geradores de valor para o comprador são construídos ao longo de várias atividades realizadas por diferentes agentes econômicos dentro da cadeia de suprimentos (VILELA e DEMAJOROVIC, 2006).

O conceito de cadeia de suprimentos surge para descrever todas as atividades precedentes e atribuídas a um produto, acabado ou de intermediário, ou um serviço entregue ao consumidor. Segundo Santos (2011), ela está associada à ideia da divisão do trabalho por diferentes agentes situados em vários setores econômicos, por meio das diversas atividades realizadas em momentos e locais diferentes, que contribuem diretamente para a realização de um bem ou um serviço ao consumidor.

É importante observar que o fluxo é bilateral, ocorrendo tanto no sentido de fornecedores para os clientes, como no sentido contrário, dos clientes para os fornecedores. Estes fluxos são em sua maioria de materiais e de informações, respectivamente. Alguns autores definem montante (ou *upstream*) o sentido pelo qual as informações, materiais ou suprimentos passa no sentido dos fornecedores e à jusante (ou *downstream*) quando o fluxo é no sentido do cliente final. Segundo Pires (2011), essa nomenclatura faz uma analogia direta do fluxo de materiais com o fluxo de um rio: rio abaixo (a jusante) e rio acima (montante).

Assim, a cadeia são todas as atividades relacionadas ao desenvolvimento do produto que o mercado consome, desde suas atividades primárias na obtenção das matérias prima até os processos de fabricação ou transformação. A figura 2.1 ilustra uma cadeia de suprimentos genérica.

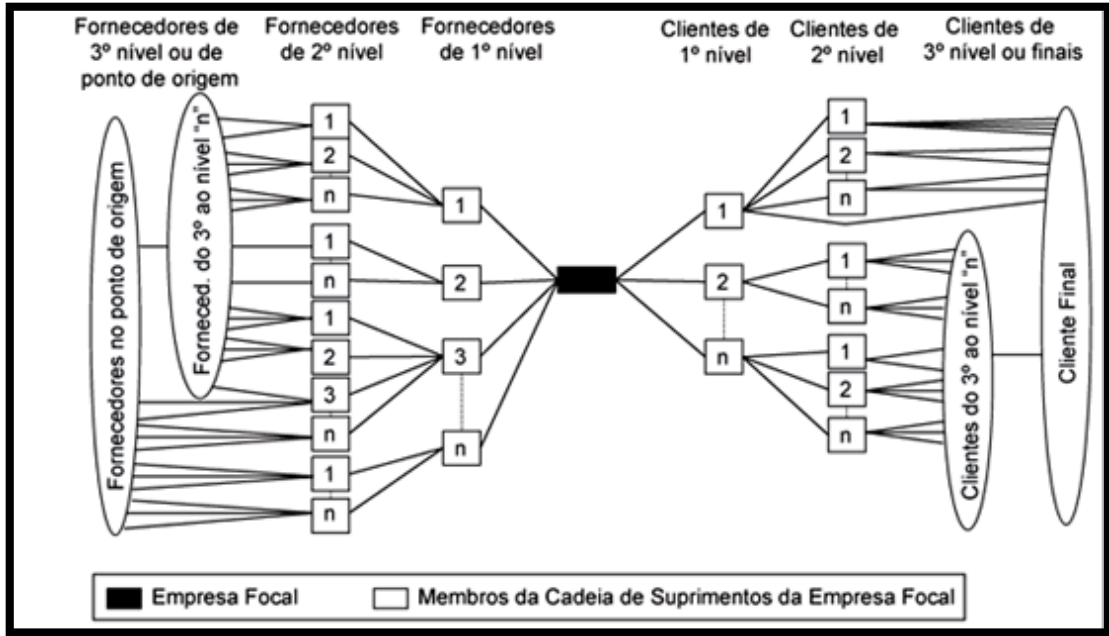


Figura 2.1 - Ilustração de uma cadeia de suprimentos. Fonte: Lambert *et al.*, 1998.

Pela importância do tema, são citadas também algumas outras definições relevantes. O *Supply Chain Council* (2009) define cadeia de suprimentos como sendo uma concentração de todos os esforços envolvidos na produção e liberação de um produto final, desde o (primeiro) fornecedor até o (último) cliente. Quatro processos básicos definem esses esforços, que são: o Planejar (*Plan*), o Abastecer (*source*), o fazer (*make*) e o Entregar (*delivery*).

Para Mentzer *et al* (2001), a cadeia de suprimentos é o conjunto de três ou mais entidades (organizações ou indivíduos) diretamente envolvidas nos fluxos de produtos, serviços, financeiro e de informações, desde a fonte primária até o cliente final. Corroboram Lee e Billington (1993) ao afirmar que a cadeia representa uma rede de trabalho para as funções de busca de material, sua transformação em produtos intermediários e acabados e a distribuição desses produtos acabados aos clientes finais.

Assim, a cadeia de suprimentos pode ser entendida como um conceito que engloba os processos entre fornecedores-clientes e ligam empresas desde a fonte inicial de matéria-prima até o ponto de consumo do produto acabado.

### 2.1.1 Níveis da cadeia de suprimentos

Slack (1993) subdivide as cadeias em três níveis, de acordo com sua amplitude e tipo de tipo de organizações que interagem. São elas: a cadeia interna, cadeia imediata e a cadeia total, conforme ilustra a figura 2.2:

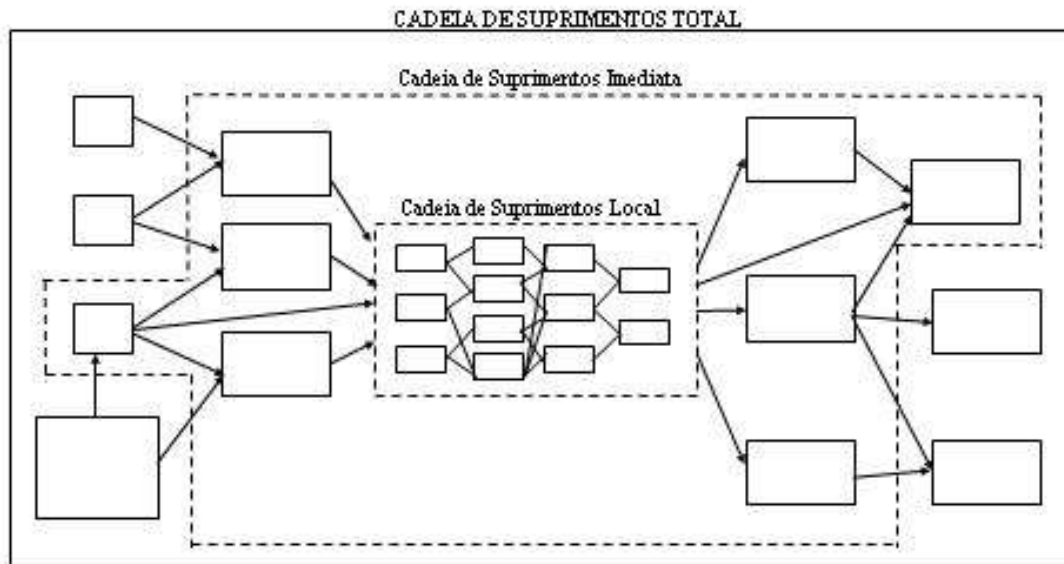


Figura 2.2 - Níveis da cadeia de suprimentos. Fonte: Slack (1993), adaptado

A cadeia interna são os fluxos de informações e materiais entre departamentos, células e setores dentro de uma empresa. A cadeia imediata é formada pelos fornecedores e clientes imediatos da empresa em questão, enquanto que a cadeia de suprimentos total é a mais abrangente de todas, abordando todas as atividades desde a matéria prima até o cliente final.

### 2.1.2 A cadeia de suprimentos como uma expansão da gestão da produção

O conceito da cadeia de suprimentos está totalmente ligado à gestão da produção. A relação das atividades internas de uma empresa, principalmente ligadas às suas entradas e saídas com as atividades anteriores e posteriores por parte dos fornecedores e clientes é intensa ao ponto de se confundirem conceitualmente.

Alguns autores defendem que a cadeia de suprimentos pode ser encarada como uma expansão natural e necessária da gestão da produção e de materiais. Esta ampliação se dá além dos limites físicos das empresas, buscando otimizar não só seus processos internos, mas partindo para uma melhoria nos processos integradamente e de maneira compartilhada. Para Pires (2011), existe uma clara necessidade de se gerenciar a cadeia de suprimentos com uma visão do todo e não apenas dentro dos limites tradicionais das empresas, passando a ser um imperativo gerenciar adequadamente os processos de negócios.

Essa interação e desenvolvimento de um relacionamento intenso visando otimização das atividades e consequente redução dos custos é fator essencial para o desenvolvimento dos produtos e de toda a cadeia produtiva de um setor, como o da energia fotovoltaica.

### **2.1.3 Cadeia produtiva**

A cadeia produtiva é um conjunto de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto ou serviço. Esse conceito engloba desde as atividades de extração da matéria prima até os serviços finais para a obtenção, instalação ou seleção do produto/serviço, num contato mais direto com o cliente ou consumidor.

Na literatura há diversas definições para a cadeia produtiva. Segundo Hasenclever e Kupfer (2002), cadeia produtiva é um conjunto de etapas consecutivas pelas quais passam e vão sendo transformados e transferidos os diversos insumos. Esta definição abrangente permite incorporar diversas formas de cadeias. Segundo Secretaria de Agricultura e Abastecimento – SEAB (1999), cadeia produtiva compreende o conjunto de agentes econômicos e as relações que se estabelecem para atender as necessidades dos consumidores por um determinado produto que tenha uma fase de produção agropecuária ou florestal. Envolve, ainda, os setores que se encontram “antes da porteira”, ou seja, de fornecimento de insumos, máquinas e equipamentos; os setores “depois da porteira”, de industrialização, atacado e varejo; além de todo o aparato tecnológico e institucional (legal, normativo, regulatório, etc.)

Hasenclever e Kupfer (2002) afirmam que as cadeias produtivas resultam da crescente divisão do trabalho e maior interdependência entre os agentes econômicos. Por um lado, as cadeias são criadas pelo processo de desintegração vertical e especialização técnica e social. Por outro lado, as pressões competitivas por maior integração e coordenação entre as atividades, ao longo das cadeias, amplia a articulação entre os agentes.

De acordo com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio (2015), o uso do conceito de cadeia produtiva permite, entre outros: (i) visualizar a cadeia de modo integral; (ii) identificar debilidades e potencialidades nos elos; (iii) motivar articulação solidária dos elos; (iv) identificar gargalos, elos faltantes e estrangulamentos; (v) identificar os elos dinâmicos, em adição à compreensão dos mercados, que trazem movimento às transações na cadeia produtiva; (vi) maximizar a eficácia político-administrativa por meio do consenso em torno dos agentes envolvidos; (vii) identificar fatores e condicionantes da competitividade em cada segmento.

## **2.2 Energia Fotovoltaica**

É a energia obtida através da conversão da irradiação proveniente do sol em eletricidade. É uma energia de fonte inesgotável e abundante em todo o planeta e considerada uma alternativa para enfrentar os desafios da expansão da oferta de energia mundial para os próximos anos com redução dos impactos ambientais.

Utiliza como princípio básico o efeito fotovoltaico, que ocorre nas células sensíveis a luminosidade. Essas células são dispositivos fabricados com materiais semicondutores onde ocorre excitação dos elétrons na presença de irradiação. O processo de captar a energia dos raios solares e transformar em energia elétrica requer ainda um sistema composto por equipamentos eletrônicos interligados entre si capazes de transportar e armazenar a energia ou alterar suas características. Esse sistema se destaca pela possibilidade de poder ser aplicado tanto em pequenas produções autônomas residenciais ou prediais como geração em grande escala.

### **2.2.1 Energia solar fotovoltaica no Mundo**

A possibilidade de produzir energia a partir dos raios solares foi primeiramente descoberta em 1839, por Edmond Becquerel. Ele detectou uma diferença de potencial causada por absorção de irradiação solar. A partir de então novas pesquisas científicas aprimoraram os dispositivos capazes de gerar energia a partir dessa tecnologia. Mas apenas em 1956 iniciou-se a primeira produção industrial. Até então, a existência dessa tecnologia era praticamente nula.

Dois fatores contribuíram para o crescimento de pesquisas no setor: a “corrida espacial” e o setor de telecomunicações. Enquanto a primeira utilizou – e até hoje utiliza – a energia fotovoltaica para geração e armazenamento de energia em estações espaciais, o segundo buscou utilizar esse modelo de geração para fornecer energia em sistemas instalados em localidades remotas.

A crise do petróleo na década de 1970 ampliou o interesse na diversificação das fontes de energia, aumentando o interesse nas renováveis e intensificou os investimentos na energia solar. Porém, os custos dessa tecnologia tornavam-na ainda inviável. Era preciso reduzir os custos de produção das células fotovoltaicas (ABINEE, 2012).

No início da década de 1990, com os avanços adicionais da tecnologia e a significativa redução nos seus custos, além das urgências de ordem ambiental, a conversão fotovoltaica teve as suas aplicações ampliadas e inseriu-se crescentemente no mercado mundial. Além disso, políticas de incentivo em países como Alemanha e Japão resultaram em aumentos substanciais no desenvolvimento desse mercado. Essas políticas foram impulsionadas, em parte, por um forte compromisso com a redução de dióxido de carbono, conforme previsto pelo Protocolo de Kyoto, e em parte para desenvolver o mercado dessa tecnologia para exportação (PINTO E GALDINO, 2014). Esse desenvolvimento foi fundamental para a consolidação desse modelo de geração no mundo.

Hoje, a energia fotovoltaica é um dos modelos de geração que mais crescem no mundo e já se consolidou no cenário mundial como uma alternativa com baixos impactos ecológicos frente às fontes tradicionais largamente exploradas. Para Bretas (2015), embora ainda represente apenas 0,8% da matriz elétrica mundial, a energia solar hoje se tornou a fonte que mais cresce. Com um ritmo de crescimento em média 54,2% ao ano desde 2004 (PINTO E GALDINO, 2014), a capacidade instalada mundial cresceu 98% entre 2004 e 2013, atingindo 139 GW no começo de 2014. Metade dessa capacidade foi instalada nos últimos dois anos, segundo o Relatório Estado Global das Renováveis 2014, produzido pela REN 21.

Países como a Alemanha, Itália, França e Espanha fizeram a Europa se posicionar como pioneira de investimentos maciços nessa tecnologia e dominar o mercado consumidor. No continente europeu encontram-se instalados aproximadamente 70% da produção mundial.

Porém, a preocupação com diversificação das fontes de energia, impactos ambientais e acidentes em usinas de outras formas de produção, além da viabilidade econômica atingida - o preço dos painéis caiu 66% em apenas quatro anos, o que está a tornar esta fonte de energia tão apetecível quanto a energia produzida através de recursos fósseis - fizeram com que os investimentos se expandissem para outros países além da Europa. China, Japão e Estados Unidos foram os líderes em instalações de painéis solares em 2013.

A grande novidade do ano foi a Ásia, que passou a Europa no quesito e merece destaque nessa nova fase da energia fotovoltaica. O continente asiático foi responsável por 22,7 GW das instalações, enquanto 16,7 GW foram instalados no restante do mundo. Na China, mais do que incentivar o uso de tecnologias através de programas governamentais, a política mais agressiva está voltada para a produção e exportação de células e módulos fotovoltaicos (PINTO E GALDINO, 2014). A China atingiu uma fabricação de 64% de toda a produção mundial de módulos fotovoltaicos e a Ásia como um todo, 85%. Está influenciando nessa expansão da capacidade de produção asiática o fenômeno de deslocamento de empresas europeias e norte-americanas para a região asiática em busca de uma cadeia produtiva consolidada, mão de obra qualificada e redução dos custos de produção, além de incentivos para financiamentos de instalação e funcionamento. A figura 2.3 mostra o crescimento da produção de células fotovoltaicas no mundo.

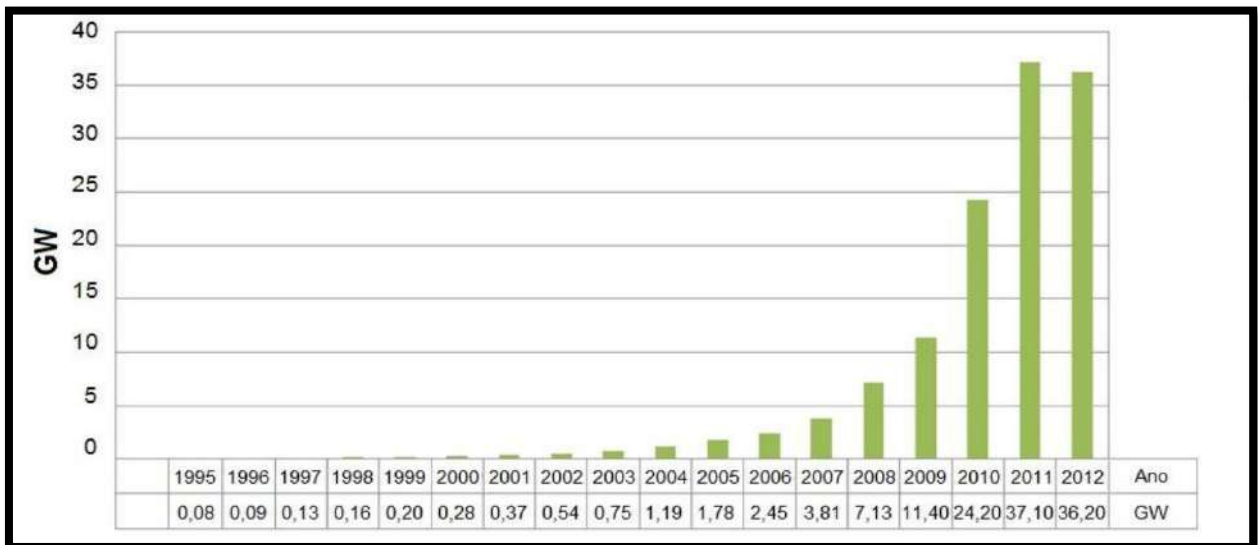


Figura 2.3 - Produção mundial de células fotovoltaicas. Fonte: Roney, 2013.

As políticas governamentais e metas em diversos países fazem esse mercado cada vez mais promissor e crescer a níveis elevados. A Alemanha tem uma meta de atingir 80% da participação das energias renováveis na matriz energética até 2020. Nos Estados Unidos o uso das renováveis tomou mais importância depois de pressões internacionais para acordos que visam a redução do aquecimento global. Segundo Ribeiro (2015), espera-se que as renováveis representem, entre 2015 e 2020, cerca de 50% da capacidade instalada nos EUA. O Japão, que desde o desastre de Fukushima está a tentar aumentar o uso de energias limpas, deverá instalar 12,7GW de energia solar durante este ano, o valor mais elevado logo a seguir ao da China, que deverá chegar aos 17,8 GW em 2015 (RIBEIRO, 2015). A China instalou em 2014 um total de 10.560 Megawatts, aproximadamente o equivalente a uma usina hidroelétrica de Belo Monte (em construção no Brasil). A Índia e a África do Sul são outros países que voltaram suas atenções para o setor e já possuem crescimentos consistentes.

Deve-se notar que apesar da consolidação da tecnologia, redução dos custos e melhorias tecnológicas, o custo das células fotovoltaicas ainda é uma barreira que impede um maior desenvolvimento do setor, sendo o principal empecilho para uma expansão ainda maior. Entretanto, segundo Pinto e Galdino (2014), a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, em razão, tanto dos seus custos decrescentes quanto dos custos crescentes das demais formas de produção de energia, inclusive em função da internalização de fatores que eram posteriormente ignorados, como a questão de impactos ambientais. Estes fatores constituem um cenário otimista e promissor para a indústria fotovoltaica.

### **2.2.2 Energia solar fotovoltaica no Brasil**

O território brasileiro apresenta destaque no cenário mundial como um dos países com melhores condições de exploração da energia fotovoltaica. Clima adequado e grande extensão territorial, com índices de irradiação solar elevados se comparados aos países que mais utilizam essa fonte de energia criam condições favoráveis no país. Porém, o Brasil apresenta apenas pequenas aplicações da tecnologia, que contribuem em níveis irrisórios para a matriz energética nacional. O desenvolvimento tecnológico e industrial é baixo, apresentando dificuldades para se consolidar e baixos incentivos governamentais.



O histórico de conversão de energia solar em elétrica no país começou timidamente nos anos 50, com o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos no Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e no Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA). Na década de 1970 o Instituto Militar de Engenharia (IME) iniciou o desenvolvimento de tecnologia de células fotovoltaicas por filmes finos. Iniciativas isoladas prosseguiram desde então, como o desenvolvimento em escala experimental de várias tecnologias relacionadas à purificação de silício e fabricação dessas células em várias universidades nas décadas de 1980 a 1990 e a produção de células fotossensíveis para aplicação em satélites brasileiros. Embora tenha sido um desenvolvimento modesto, acompanhou o que ocorria em países hoje tidos como referência no assunto (PINTO e GALDINO, 2014).

Entretanto, a partir de 1990 a tecnologia fotovoltaica no mundo se expandiu rapidamente, principalmente na Alemanha, Japão e outros países europeus. Incentivados por ações e planos governamentais e buscando aplicações associadas ao uso de energia em residências, essa tecnologia começou seu processo de consolidação no cenário mundial, enquanto que o Brasil continuava com isoladas aplicações, fabricações em pequena escala e estudos na área. Essa defasagem em relação ao cenário mundial se intensificou com o avanço tecnológico e redução dos custos que tornaram a energia fotovoltaica viável e difundida no mundo, principalmente com a entrada da China no setor.

Esse cenário começou a melhorar na década de 2000, com iniciativas do governo para inserção da energia solar na matriz energética nacional. A instauração do programa Luz para Todos, do governo federal, mas de responsabilidade das concessionárias, vem sendo realizada primordialmente por meio de expansão das redes de distribuição para áreas remotas, mas também proporcionou a instalação de sistemas fotovoltaicos isolados. Os estados da Bahia e Minas Gerais são destaques nesse quesito, além de projetos pilotos como o no município de Xapuri, no Acre. Desde então, vêm se intensificando a atenção e investimentos no setor, mas ainda de forma tímida e insuficiente para acompanhar o setor no âmbito mundial.

Atualmente, a capacidade de sistemas fotovoltaicos no Brasil, incluindo os sistemas isolados e conectados à rede é da ordem de 30 a 40 MWp (ABINEE, 2012). Para Pinto e Galdino (2014) que o país ainda não apresenta atratividade para a instalação de indústria de módulos fotovoltaicos, apresentando apenas algumas fábricas para fabricação de modelos de pequena escala para sistemas isolados e afirma que o número de empresas domésticas de projetos e instalações de sistemas fotovoltaicos é pequeno e com pouca experiência.

Entretanto, o país vem buscando o desenvolvimento dessa tecnologia e da sua indústria. São destaques a inauguração da primeira usina fotovoltaica (UFV) no Brasil, situada em Tauá, no Ceará e os primeiros leilões de energia fotovoltaica no país. Em maio de 2015, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) anunciou o credenciamento de 382 projetos para serem leiloados, que se forem concretizados adicionarão 12.528 megawatts (MW) de capacidade energética para os próximos anos. Apesar de produzir somente 0,01% da matriz energética nacional, estimativas do setor apontam que, até 2050, a fonte deverá corresponder a 13% de toda a energia produzida no Brasil (BRETAS, 2015).

## **2.3 Tecnologias de geração de energia solar fotovoltaica**

### **2.3.1 Sistemas fotovoltaicos**

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por módulos, inversores, dispositivos de proteção, sistema de fixação e suporte dos módulos, cabos e, opcionalmente, baterias e controladores de carga (ABINEE, 2012). Somente os sistemas isolados possuem baterias e controladores de cargas, pois precisam atender a demanda energética durante o período em que gera energia e períodos onde não é possível isso ocorrer. Assim, necessitam serem superestimados. Os sistemas conectados à rede elétrica não necessitam de baterias, tornando-os mais simples.

Apresenta-se a seguir uma breve descrição dos equipamentos utilizados na geração de energia, relacionados à figura 2.4, que esquematiza um sistema genérico:

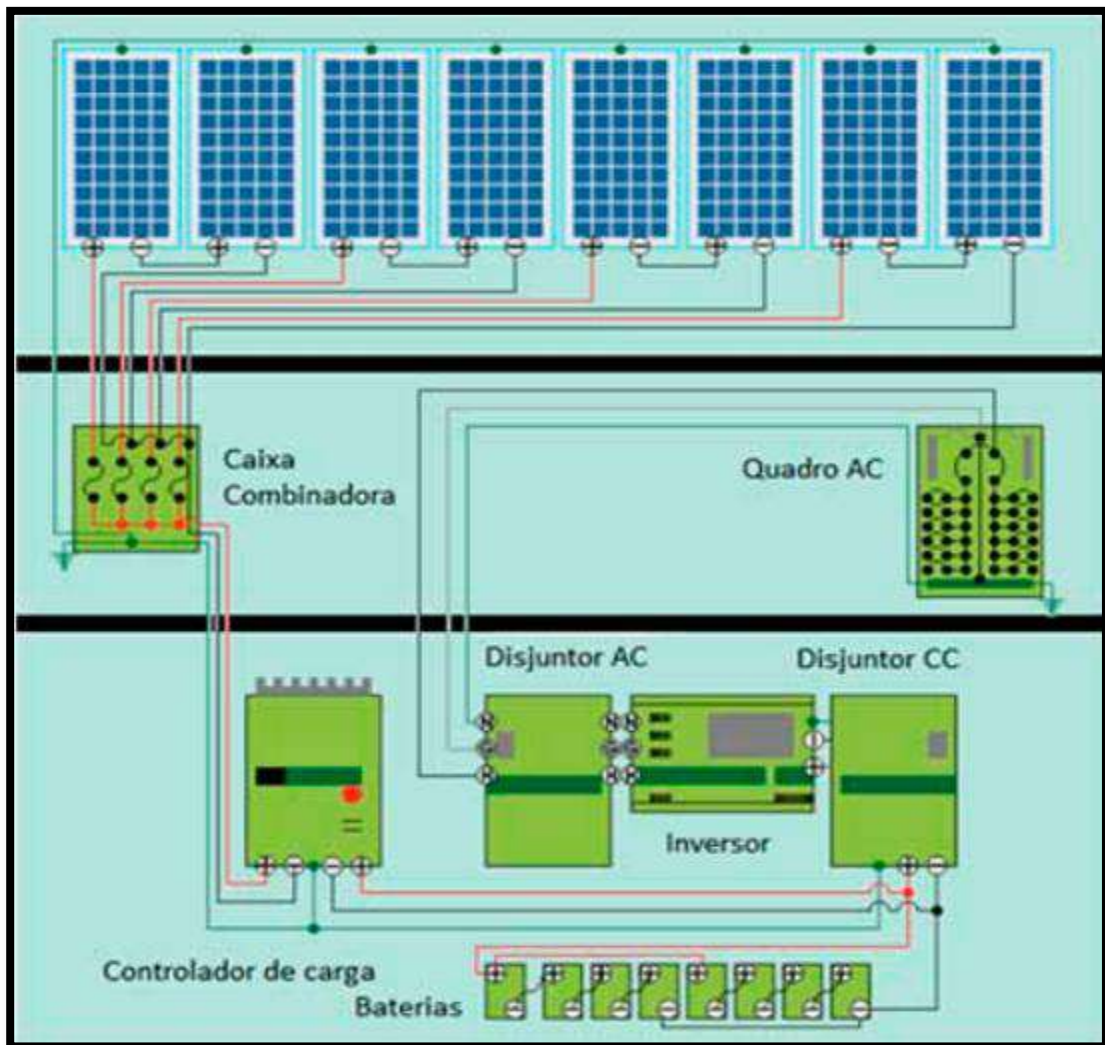


Figura 2.4 - Componentes de um sistema fotovoltaico isolado. Fonte: ABINEE, 2012.

### 2.3.1.1 Módulos

Os módulos são os painéis solares, onde estão as células capazes de gerar energia por diferença de potencial. Como as células produzem uma tensão elétrica pequena, da ordem de 0,5 a 0,6 volts para cada célula de silício cristalino, os módulos devem ser construídos, por exemplo, com 60 células de 0,5 volts conectadas, para atingir uma tensão resultante de 30 volts. Assim, o número de módulos é determinado de maneira a atingir a potência desejada para todo o sistema. É a parte do sistema que permanece mais exposta, sofre alteração da produção por temperatura, variações meteorológicas e sofrem alteração na eficiência em decorrência do tempo.

A face que fica exposta ao sol é revestida em vidro e a face posterior com plástico, vidro ou outros substratos. O entorno é revestido com alumínio anodizado, para dar rigidez e proteção contra as intempéries. O que diferencia os módulos é a tecnologia utilizada nas células e os elementos que a constitui. Os materiais mais utilizados hoje para a fabricação das células fotovoltaicas são o silício monocristalino (31%) e policristalino (57%) e os chamados filmes finos: silício amorfo e silício microcristalino ( $\mu\text{-Si}$ ) (a-Si +  $\mu\text{-Si}$ : 3,4%), telureto de cádmio (CdTe) (5,5%) e (dis) seleneto de cobre (gálio) e índio com 2,4% (ABINEE, 2012).

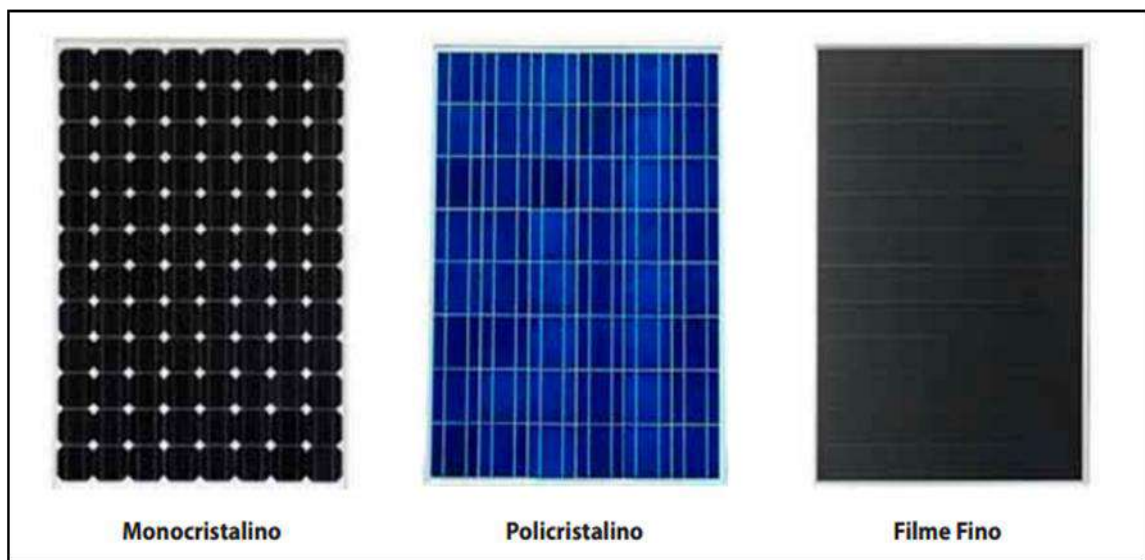


Figura 2.5 - Módulos fotovoltaicos mais comuns. Fonte: ABINEE, 2012.

### 2.3.1.2 Inversores

Os inversores são os dispositivos responsáveis por transformar a corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada. Esses dispositivos elétricos ou eletromecânicos são capazes de adequar a tensão da corrente, deixando-a com frequência e formato de onda os mais próximos da corrente da rede elétrica, no caso de sistemas interligados.

### 2.3.1.3 Cabos

Os cabos são os responsáveis pela transmissão da energia pelo sistema. São dimensionados de forma a reduzir as perdas durante o transporte, de acordo com a potência instalada e a distância percorrida. Entre os módulos e os inversores e entre os inversores e o quadro de força devem existir esquemas de proteção, que são disjuntores, dispositivos de proteção contra surtos atmosféricos (DPS), chaves seccionadoras etc., empregados para proteger e isolar o sistema fotovoltaico para execução de reparos ou manutenção. (ABINEE, 2012).

#### 2.3.1.4 Controladores de cargas e baterias

Os controladores e baterias são utilizados primordialmente em sistemas isolados, para armazenamento e controle de cargas a serem utilizados em momentos onde não há geração de energia. Os controladores são dispositivos eletrônicos que administram a carga e descarga das baterias, atuando com corrente contínua.

Geralmente, o fluxo de carga ocorre durante o dia, onde há uma produção superior ao que se demanda para o período e descarga durante a noite, quando não há produção e o consumo é abastecido pela energia armazenada durante o dia.

Nesse processo, a célula é fundamental. Ela é composta, em sua maioria, de material semicondutor de silício, elemento em abundância no planeta. Mas há também outras tecnologias que utilizam novos compostos para captação da energia. Neste capítulo, o sistema de geração de energia e as diferentes tecnologias das células fotovoltaicas para geração de energia são apresentadas.

## 2.4 Classificação dos sistemas fotovoltaicos

O sistema de geração de energia a partir da radiação solar pode ser classificado como sistemas isolados (*off-grid*) ou sistemas integrados à rede elétrica (*on-grid*). No primeiro, o sistema produz energia em corrente contínua que pode ser utilizado para consumo residencial. A energia também pode ser armazenada em baterias para uso posterior. É mais utilizado em regiões remotas e pode ser usado para uma única residência ou uma comunidade, a depender da demanda e da capacidade instalada.

No segundo caso, a energia é integrada a rede, se ajustando da demanda momentânea do autogerador. É necessário um sistema de compensação da energia gerada pelo produtor autônomo. Necessita um inversor de frequência e sistema de medição multidirecional.

Há, ainda, os sistemas híbridos, onde a geração de energia fotovoltaica se dá em um conjunto com outros sistemas, como o eólico, diesel ou até a própria corrente da energia disponível na localidade.

## 2.5 O efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o processo pelo qual a energia elétrica é gerada a partir da incidência de irradiação em um material fotossensível. O mais utilizado atualmente é o silício, que por natureza, um material mal condutor elétrico por não possuir elétrons livres em sua forma pura. Para que ele se torne um semicondutor é feito o processo de dopagem, onde são acrescentados outros elementos para criar um produto portador de cargas positivas livres ou cargas negativas livres, que são necessários para geração de energia.

Separadamente, ambos os materiais são neutros, porém quando unidos formam um campo elétrico. Quando a radiação solar incide sobre a célula fotovoltaica, os fótons fornecem energia para os elétrons livres, transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado na junção das partes, os elétrons são orientados e fluem de uma camada para a outra entre as placas. Esse fluxo é a corrente elétrica gerada no processo.

É importante citar que o processo de geração de energia fotovoltaica não armazena energia. Ele só gera a energia quando há irradiação incidindo sobre a superfície fotossensível e quando há uma diferença de potencial gerada a partir da sensibilidade do material.

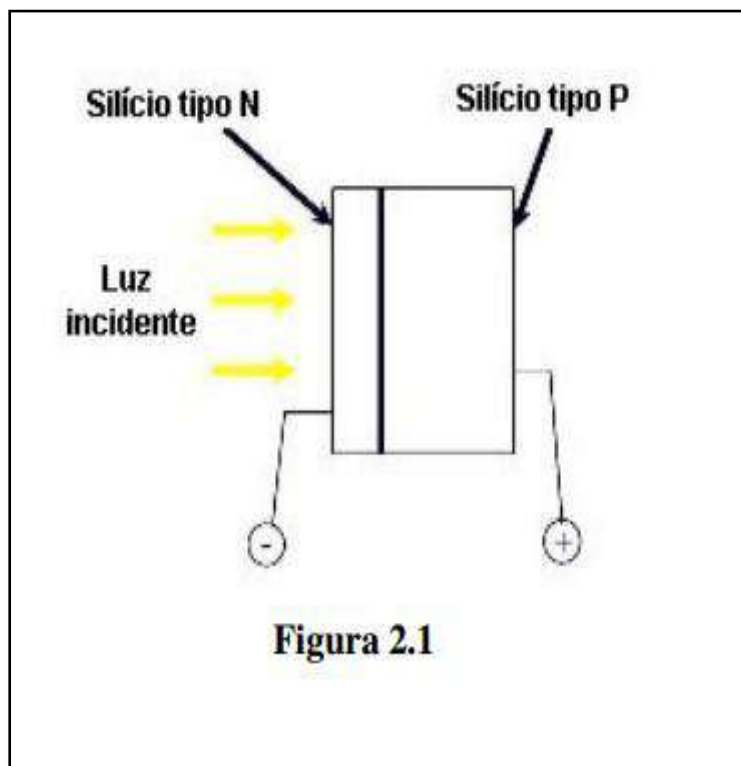


Figura 2.6 - Célula fotovoltaica de silício. Fonte: NASCIMENTO, Cássio (2004)

### **2.5.1 Células de silício monocristalino**

As células fotovoltaicas de silício monocristalino são feitas a partir de um único cristal. Esse cristal é separado em lâminas finas que são transformadas em fotossensíveis posteriormente. Logo após, são montados os painéis solares para captação da irradiação solar, com as células organizadas em série e em paralelo.

A tecnologia dos monocristais é uma das mais antigas. Os modelos disponíveis no mercado possuem índices de eficiência em média de 15% a 20%, sendo uma das mais eficientes disponíveis. Devido sua alta eficiência, requer menor espaço de instalação, sendo mais uma vantagem desse modelo. Possuem vida útil projetada de 30 anos e têm capacidade de funcionamento eficiente com baixa incidência de radiação solar. Sua desvantagem é o investimento necessário: possuem custos relativamente altos, se comparados com outras tecnologias.

### **2.5.2 Células de silício policristalino**

A diferença entre as células de policristalino com as monocristalinas está no método utilizado na fundição dos cristais. No policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, proporcionando a formação de múltiplos cristais. Depois de fundidos, são divididos em blocos quadrados e depois laminados para produzir as células. É um processo mais fácil de ser executado do que o processo de fabricação dos monocristais.

Entre as vantagens desse modelo, pode-se citar o baixo desperdício de silício durante a fabricação, além de custos reduzidos de aquisição e vida útil também entre 25 e 30 anos, como os monocristais.

Uma das desvantagens é o índice de eficiência reduzido em comparação com os monocristalinos. Os policristais apresentam eficiência entre 13 e 17%. Assim, necessitam de áreas maiores para geração de energia, se comparando com outras tecnologias.

### **2.5.3 Células de silício Amorfo**

As células fotovoltaicas de filme fino, ou células fotovoltaicas de película fina (TFPV), são fabricados depositando uma ou várias camadas finas de material fotovoltaico sobre um substrato.

No caso das células de silício amorfo, várias camadas de células são combinadas em camadas, resultando em taxas mais elevadas de geração de energia. Nesse processo, há uma economia da matéria prima principal, o silício, na base de 95%, embora o processo de empilhar as camadas seja caro e necessite de mão de obra especializada e a taxa de eficiência de geração nessa tecnologia varie de 6% a 9%.

#### **2.5.4 Células fotovoltaicas orgânicas**

É um tipo de célula fotovoltaica feita de polímeros orgânicos semicondutores, para absorção e transporte de cargas para a produção de eletricidade a partir do efeito fotovoltaico. Esta tecnologia foi idealizada para ser de baixo custo com células flexíveis e materiais abundantes. Porém, pelo fato de ser uma tecnologia relativamente nova, seu processo de produção *roll-to-roll* ainda está em desenvolvimento. Além disso, uma outra desvantagem é a eficiência de geração em torno de 10% e uma durabilidade não tão estável quanto das células de silício.

Uma das principais vantagens é que esse material é flexível, podendo se adequar à diversas superfícies e serem configuradas em vários formatos para atender às características próprias de cada aplicação.



## **CAPÍTULO 3 - CADEIA PRODUTIVA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA**

O capítulo tem como escopo apresentar a cadeia produtiva genérica da energia fotovoltaica, demonstrando os setores envolvidos desde a captação dos minérios para fabricação dos materiais até a instalação e manutenção das usinas fotovoltaicas.

Em ciência das diversas tecnologias envolvidas para geração da energia a partir da radiação solar, tem-se que para cada tipologia tecnológica há uma especificidade na cadeia produtiva. Buscando uma análise objetiva da cadeia produtiva brasileira, esse trabalho focou no estudo da cadeia produtiva da tecnologia de geração a partir de silício monocristalino e policristalino, visto que são as tecnologias, na atualidade, mais utilizadas no mercado nacional e estabelecidas no mercado mundial.

### **3.1 A cadeia produtiva fotovoltaica**

A energia fotovoltaica possui uma cadeia produtiva diferenciada, se comparada às demais fontes de energia, pois trata-se de uma cadeia com componentes específicos do setor. Nela, encontram-se desde grandes empresas produtoras de silício metalúrgico até pequenas empresas prestadoras de consultorias e suporte técnico. A figura 3.1 descreve a estrutura da cadeia produtiva necessária para a indústria fotovoltaica monocristalina e policristalina.

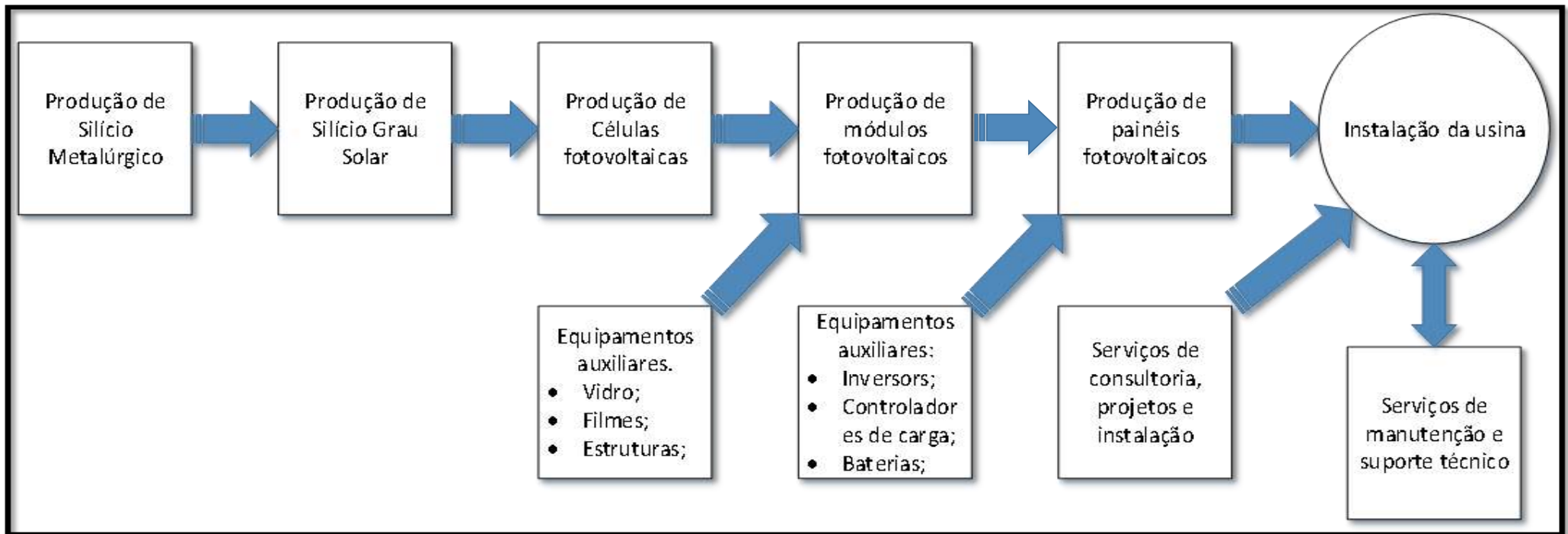


Figura 3.1 - Cadeia produtiva simplificada da indústria fotovoltaica. Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.1 Produção de Silício metalúrgico

A cadeia produtiva tem início com a produção do silício metalúrgico. Ele é a matéria-prima básica para produção de células e é proveniente da mineração e do tratamento do quartzo. O processo de obtenção é realizado em forno de arco a uma temperatura superior à 1900°C o silício líquido se acumula no fundo do poço, onde é extraído e resfriado, apresentando um grau de pureza de até 99,5% (CARVALHO e MESQUITA, 2014).

As principais matérias primas do processo são, principalmente, recursos naturais: quartzo, madeira e carvão. A figura 3.2 demonstra os recursos naturais necessários para produção do silício metalúrgico.

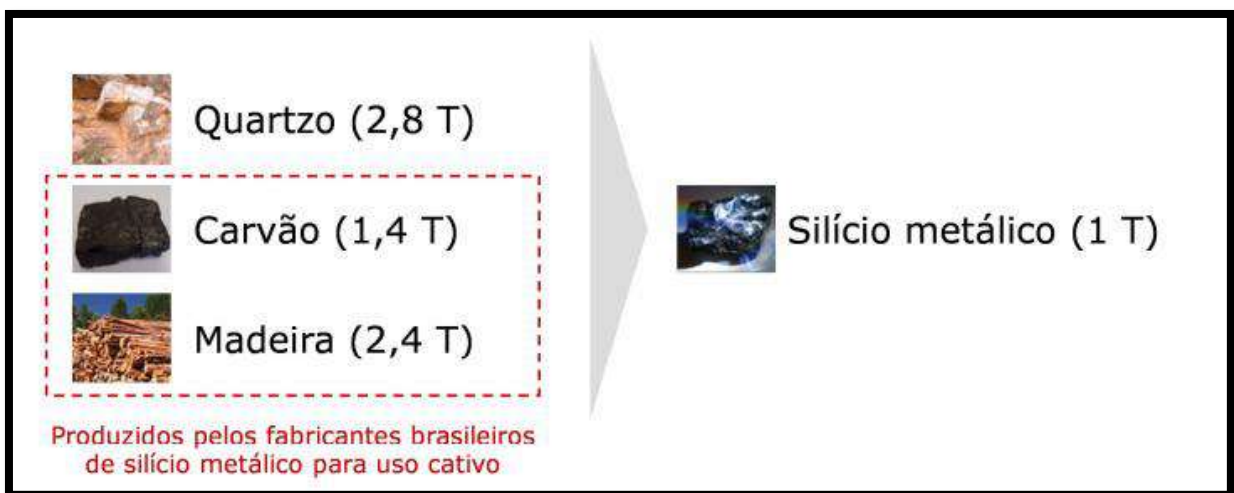


Figura 3.2 - Matérias-primas do silício metálico. Fonte: Globe Specialty Metals, 2013.

O quartzo é a principal matéria para obtenção do silício metalúrgico. Ele é o segundo mineral mais abundante no planeta Terra, atrás apenas do oxigênio. O carvão é utilizado como agente redutor, interagindo com o quartzo, capturando o oxigênio mineral e liberando dióxido de carbono como resíduo. Nesse processo, é possível utilizar tanto carvão mineral quanto vegetal. O carvão mineral é o mais utilizado em países como a China e Estados Unidos, devido ao baixo custo. O carvão vegetal, mais puro, é mais utilizado na produção brasileira.

A madeira é, também, utilizada como agente redutor no processo. Apesar de ter um custo superior ao carvão, ela é importante para garantir a permeabilidade do leito redutor, devido sua porosidade. Assim, tanto o carvão quanto a madeira são necessários no processo.

A obtenção do silício metalúrgico tem, ainda, uma alta demanda de energia elétrica, devido à necessidade de recursos como fornos em altas temperaturas, para reação do quartzo com o carvão. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2009), são necessários aproximadamente 11,3 MWh de energia por tonelada de silício metálico produzido, representando entre 30% e 40% do preço do silício metalúrgico. Assim, o custo da energia elétrica é um fator fundamental para a competitividade dos produtores desse setor.

Os principais produtores do silício metalúrgico no mundo são a China, Rússia, Brasil, EUA, França e Noruega. A produção mundial de silício metalúrgico em 2013, juntamente com a produção de silício ferrosilício, outro produto derivado do quartzo, foi de 7.700 mil toneladas em 2013 (CARVALHO; MESQUITA; ROCIO, 2014). A figura 3.3 apresenta a distribuição da produção no mundo.

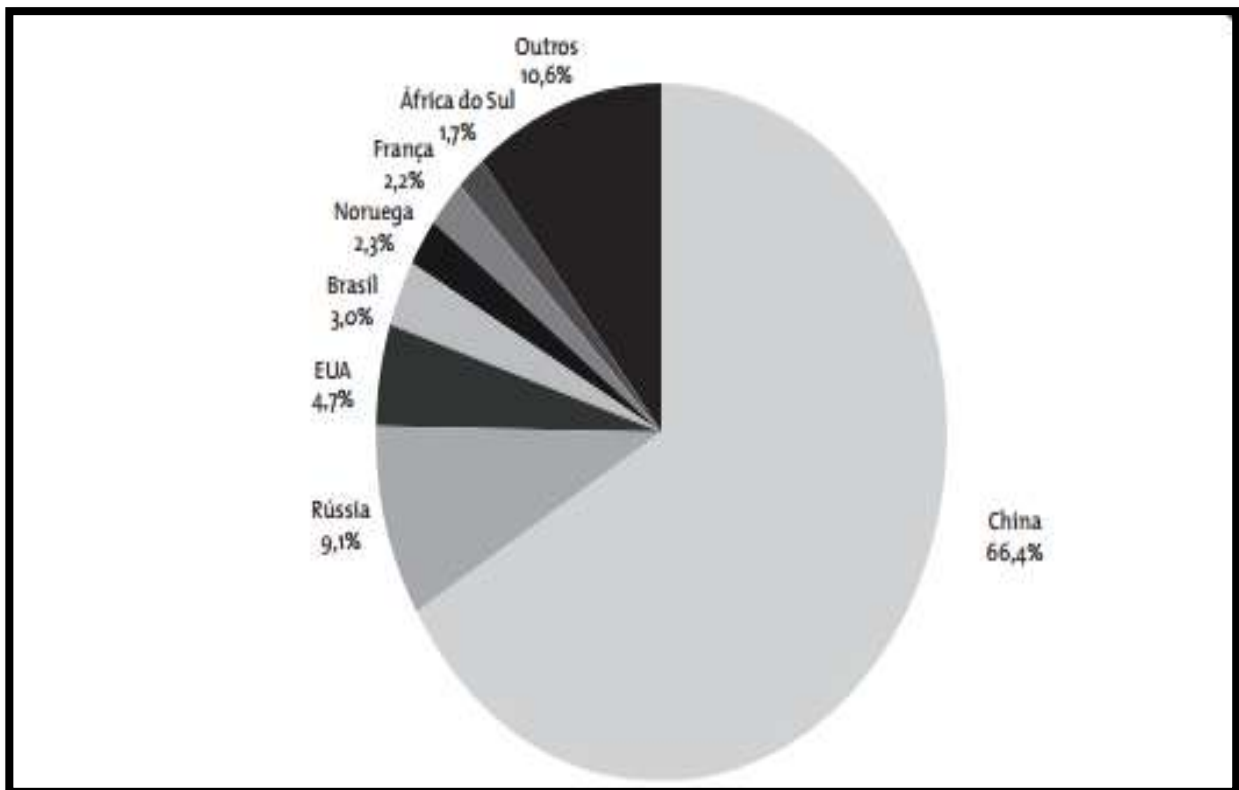


Figura 3.3 - Participação dos principais países produtores de silício, 2013. Fonte: USGS, 2014.

A produção mundial é destinada, basicamente, a dois mercados distintos: A Ásia pacífica e o mundo ocidental. A demanda por silício metalúrgico para produção de silício cristalino, segundo elo da cadeia produtiva da energia fotovoltaica, representa entre 8% e 10% da produção mundial.

### 3.1.2 Produção de silício grau solar

O silício metalúrgico, obtido na fase anterior, possui um grau de pureza de 99,5%. Entretanto, para construção de dispositivos semicondutores, é necessário um silício de maior pureza. Para tanto, faz-se necessário purificar o silício metalúrgico, obtendo, assim, o silício em grau solar, com uma pureza superior à 99,999%. Esse processo de purificação do silício e o tratamento dele requerem tecnologia avançada e possuem custos elevados.

O processo de purificação pode ser obtido através de dois processos principais: a rota química e a rota metalúrgica. A figura 3.4 detalha as possibilidades de processos de purificação do silício metalúrgico para obtenção do silício grau solar.

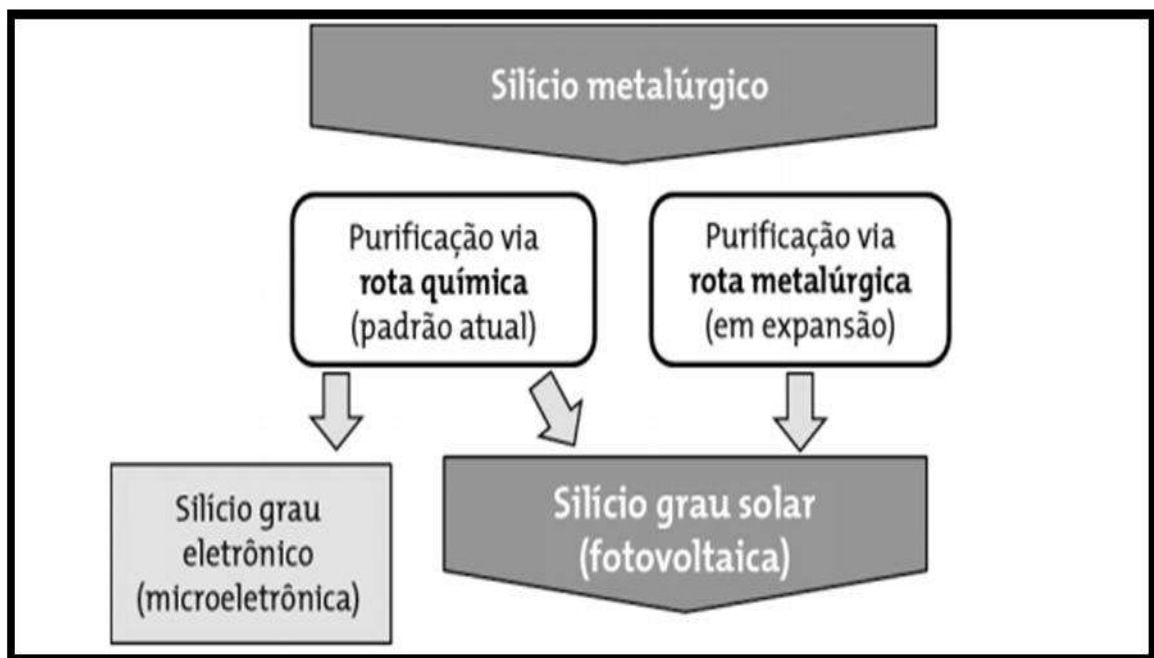


Figura 3.4 - Processos de purificação do silício metalúrgico para o silício grau solar.

Fonte: Carvalho, Mesquita e Rocio, 2014, adaptado.

Na rota química de purificação, as barras de silício metalúrgico são expostas, à temperatura de 1.150°C, ao gás triclorossilano, que se decompõe e deposita o silício puro nas barras, fazendo com que se atinja uma pureza aproximada de 99,9999999% (CARVALHO; MESQUITA; ROCIO, 2014). Vale destacar que o processo de purificação químico produz um silício com grau de pureza ainda mais elevado do que o exigido em aplicações fotovoltaicas. O produto desse processo é utilizado também para produção de peças do setor microeletrônico.

No processo de purificação por rota metalúrgica, o silício metalúrgico é submetido a uma desgaseificação a vácuo, realizada em um forno de feixe de elétrons. Este processo reduz as impurezas com pressão de vapor maior que a pressão do silício. Impurezas com pressão de vapor menor não são eliminadas (ABINEE, 2012).

A produção de silício grau solar é dominada por um número reduzido de empresas, muitas de elevado porte e atuação global. Atualmente, existem cerca de 75 empresas com tecnologia capaz de obter o silício em grau solar no mundo, e a produção global em 2013 foi de aproximadamente 228 mil toneladas e os principais líderes produtores desse setor são os Estados Unidos, Alemanha, China e Coreia do Sul. (CARVALHO; MESQUITA; ROCIO, 2014).

Devido a produção de silício cristalino requerer elevados investimentos para sua implantação, a produção mundial está concentrada em um número restrito de empresas, que representam 90% da produção total. As principais produtoras são: Wacker Chemie, Hemlock, GCL Solar e a OCI Company.

### **3.1.3 Produção de células fotovoltaicas**

Com o silício grau solar obtido, são produzidos os *wafers* e as lâminas de silício purificado, que serão transformadas em células fotovoltaicas. Nessa etapa da cadeia, a verticalização é comum e no geral, as empresas produtoras dos *wafers* também produzem células fotovoltaicas.

Vale citar que, embora as células fotovoltaicas de silício cristalino dominem o mercado, representando 90% da produção mundial em 2014, há outras tecnologias para produção das células. Entretanto, essa pesquisa se restringiu à cadeia produtiva fotovoltaica em tecnologia de silício cristalino. Nessa tecnologia, as células podem ser de dois tipos: monocristalino e policristalino.

A fabricação de *wafers* e de células tende a ser mais pulverizada, com um número maior de empresas atuantes no setor, visto que, mesmo ainda requerendo tecnologia de ponta, os requisitos são menores que os exigidos nos processos anteriores. Existem, aproximadamente, 208 empresas produtoras de *wafers* e 240 produtoras de células fotovoltaicas no mundo (KUPFER *et al*, 2012). Entretanto, apesar de mais desconcentrada, a maior parte das empresas do setor está na Ásia. A produção mundial de células fotovoltaicas em 2014 foi de, aproximadamente, 45GW. A figura 3.5 apresenta os resultados de produção mundial entre os anos 2000 e 2014.

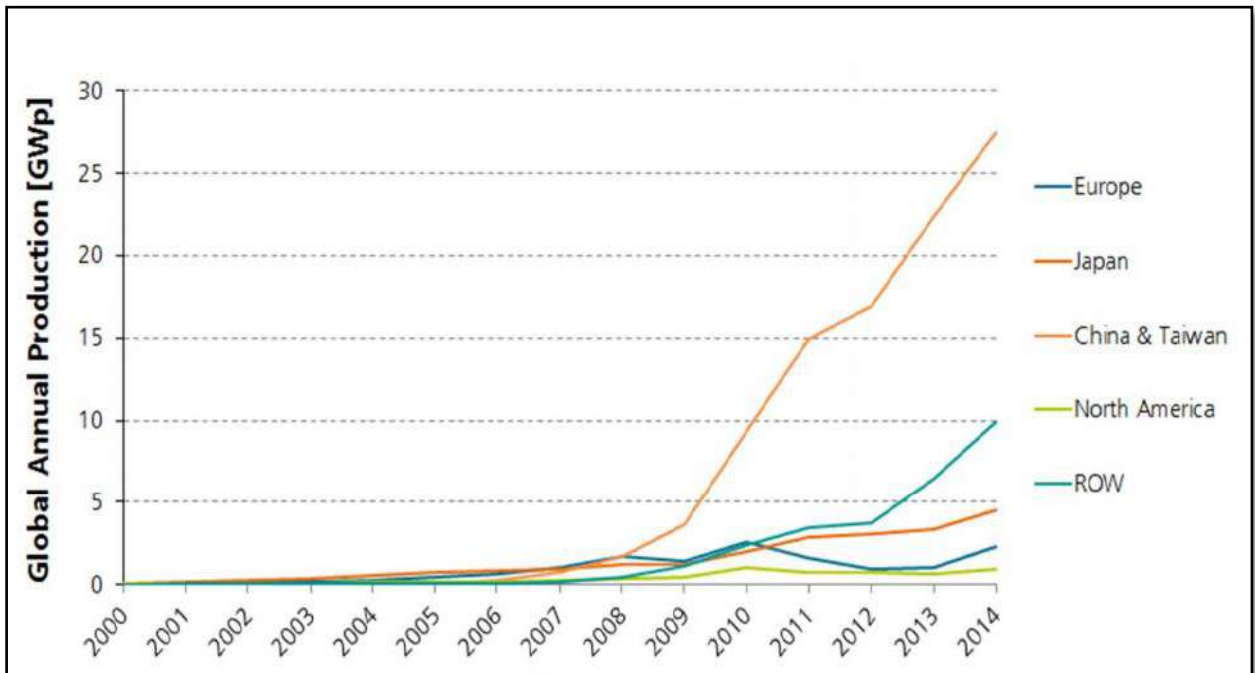


Figura 3.5 - Produção anual de células fotovoltaicas entre 2000 e 2014. Fonte: Burger *et al.*, 2015.

A China e Taiwan são destaques nesse setor, por serem os maiores produtores mundiais, responsáveis por aproximadamente 27 GW em 2014. Outros países destaques nessa produção são Japão, Estados Unidos e Alemanha (BURGER *et al*, 2015). O quadro 3.1 apresenta os principais produtores mundiais e respectivos volumes produzidos de células fotovoltaicas em 2010:

País	Região	MW	%
China	China	13.019	47,3
Taiwan	Ásia	3.391	12,3
Alemanha	Europa	2.591	9,4
Japão	Ásia	2.291	8,3
Malásia	Ásia	1.886	6,8
EUA	EUA	1.253	4,5
Coreia do Sul	Ásia	865	3,1
Filipinas	Ásia	558	2,0
Índia	Ásia	470	1,7
Cingapura	Ásia	300	1,1
Noruega	Europa	215	0,8
Espanha	Europa	188	0,7
Itália	Europa	147	0,5
Holanda	Europa	110	0,4
Bélgica	Europa	79	0,3
Grécia	Europa	72	0,3
França	Europa	58	0,2
Suíça	Europa	25	0,1
Tailândia	Ásia	14	0,1
Portugal	Europa	5	0,0
Total geral		27.535	100,0

Quadro 3.1 - Produção de células fotovoltaicas por países, 2010. Fonte: Photon International (2011).

A maior produtora é a Suntech Power, com capacidade estimada de 1,8 Gw e com planos de expansão para 2,4 Gw. A empresa está localizada na cidade de Wuxi, na província de Jiangsu, na China. A segunda maior produtora é a Jing’Ao Solar, também chinesa, com produção estimada em 1,46 GW (ABINEE, 2012).

### 3.1.4 Produção de módulos e painéis solares

Uma célula fotovoltaica, item produzido no elo anterior da cadeia, não excede, regra geral, a potência de 0,5 volts, o que é insuficiente para a maioria das aplicações reais. Portanto, faz-se necessário ligá-las em módulos, conforme esquematizado na figura 3.6.



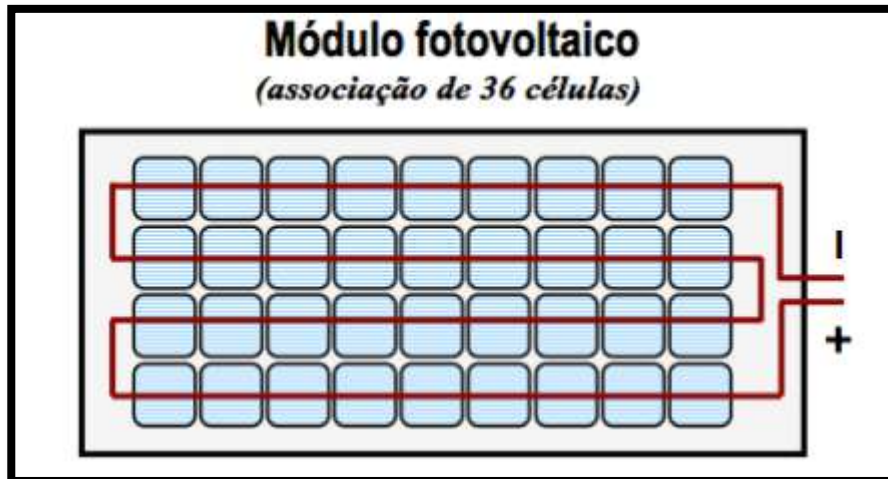


Figura 3.6 - Representação esquemática da associação de várias células fotovoltaicas. Fonte: Carneiro, 2010.

O número de células em um módulo depende, então, da tensão que se deseja gerar, variando para cada tipo de projeto. Os contatos são soldados pelos conectores com as células seguintes, de forma a gerar um fluxo de energia, quando as células reagirem com a radiação solar.

Os módulos fotovoltaicos necessitam, ainda, de revestimento específico, visando garantir a resistência às condições ambientais adversas, agentes atmosféricos, humidade, ação mecânica. Assim, os módulos são revestidos com camadas de materiais específicos: vidro, película translúcida e não refletora da radiação solar, as células fotovoltaicas e isolante elétrico, conforme ilustra a figura 3.7.

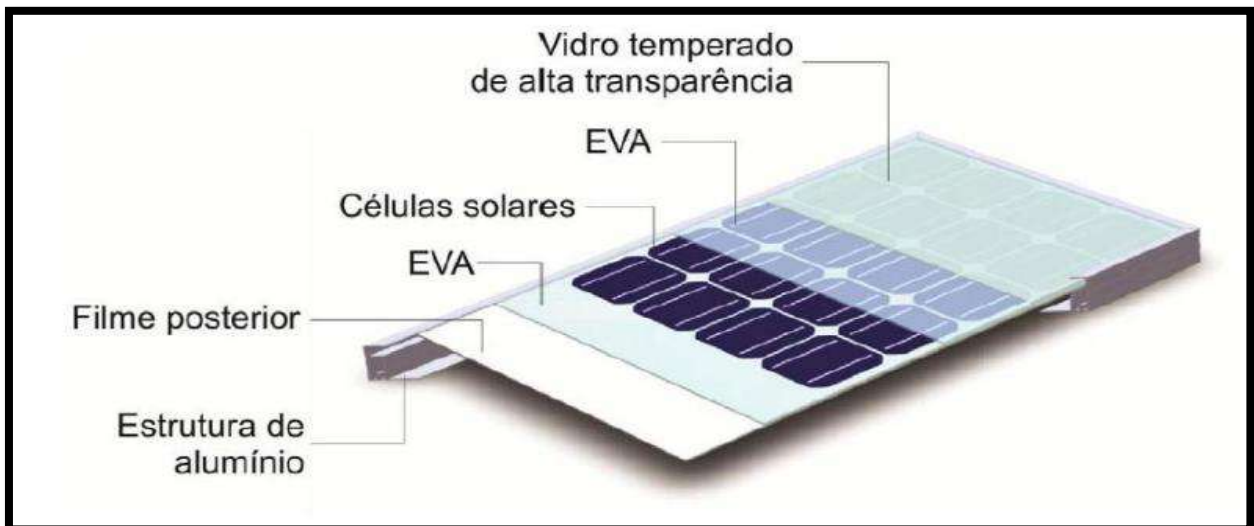


Figura 3.7 - Componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino. Fonte: Pinto e Galdino, 2014.

O agrupamento de módulos fotovoltaicos é denominado de painel fotovoltaico (do inglês *array*) conforme esquematizado na figura 3.8. O agrupamento desses módulos pode ser efetuado estabelecendo tanto ligações em séries, paralelo ou mistas. A utilização de cada ligação depende da aplicação e permite um controle da energia produzida pelo painel.

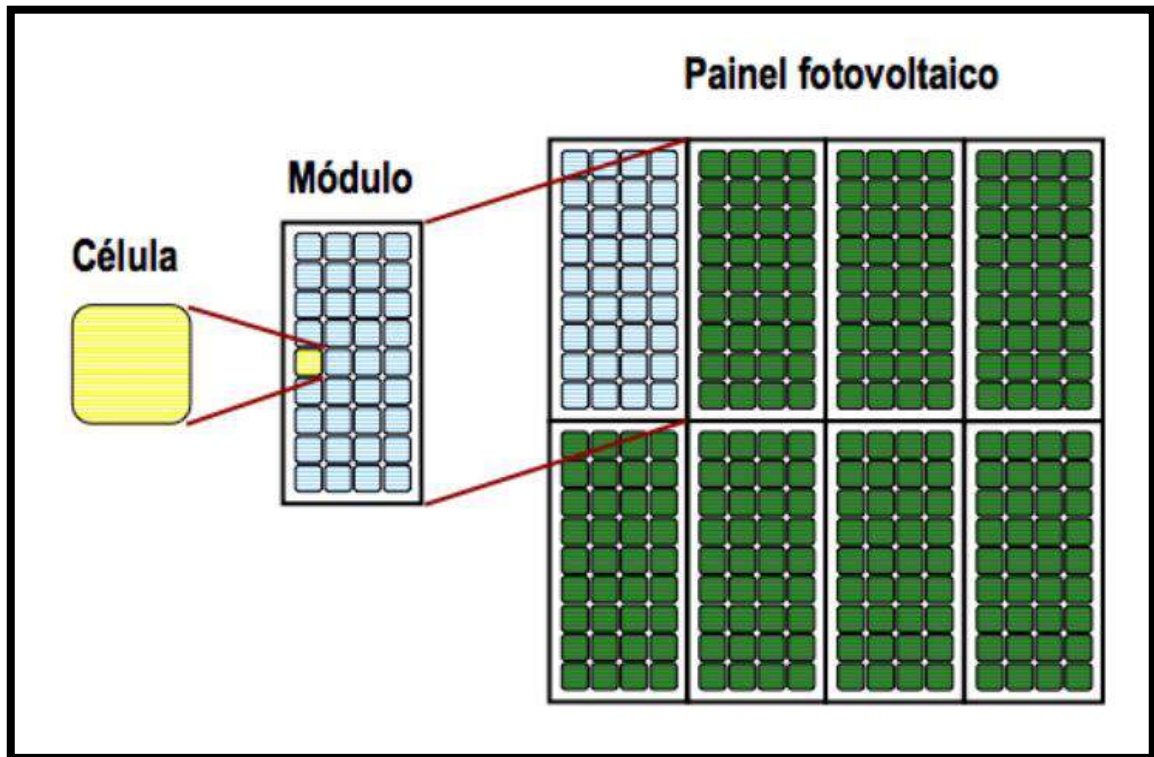


Figura 3.8 - Processo hierarquizado de agrupamento. Fonte: Carneiro, 2010.

A produção dos módulos e painéis fotovoltaicos é desconcentrada no mundo. Existem quase 1000 empresas produzindo módulos em todo o mundo, um número bastante elevado, comparando-o ao número de empresas produtoras de células fotovoltaicas. Isso ocorre porque o porte das empresas é menor. A margem de lucro também é reduzida, visto que a competitividade é dada pelo preço, não pelo domínio da tecnologia (KUPFER *et al.*, 2012). Visando a redução dos custos e riscos de transporte, pode ocorrer ainda a montagem em unidades menores e próximas ao mercado consumidor.

Em 2014, segundo Burguer *et al* (2015), a produção de módulos fotovoltaicos de silício cristalino atingiu aproximadamente 43GW, e a capacidade produtiva mundial está em 67GW. A figura 3.9 apresenta a distribuição da produção mundial de módulos fotovoltaicos por região entre 1997 e 2014.

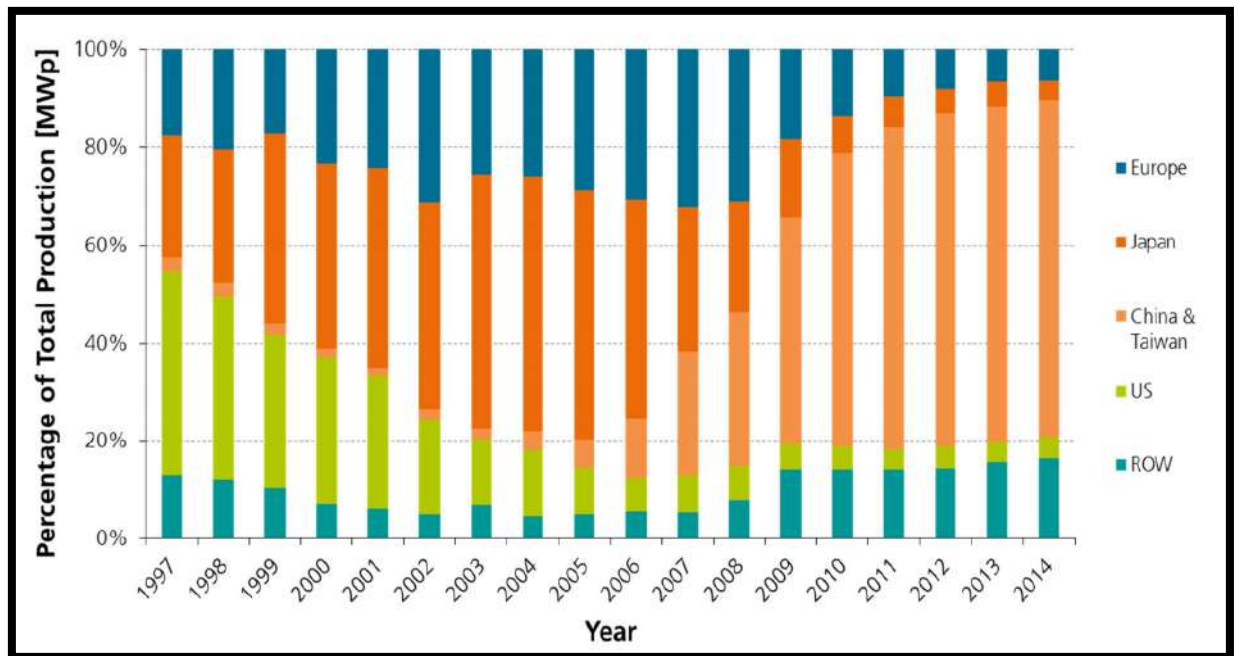


Figura 3.9 - Produção de módulos fotovoltaicos no mundo por região entre 1997 e 2014. Fonte: Burger *et al*, 2015.

A produção de módulos vem superando a demanda do mercado. Assim, os preços dos módulos vêm apresentando significativa redução e pressionando as empresas à reduzirem seus custos e margens de lucro. Com isso, muitas empresas estão transferindo sua produção para os países asiáticos, buscando melhores condições de competitividade pelo preço.

### 3.1.5 Produção dos demais componentes do sistema

Os demais componentes, a saber: baterias, controladores de carga, inversores, cabos de transmissão de energia e equipamentos auxiliares de controle; são integrados aos painéis solares para obtenção do sistema de geração de energia por efeito fotovoltaico.

Nessa fase da cadeia, há uma grande diversidade de empresas atuantes, de diversos portes. A exceção, segundo Kupfer *et al* (2012), são os produtores de inversores solares, segmento dominado por grandes empresas produtoras de equipamentos elétricos (por exemplo, a Siemens). Os inversores representam aproximadamente 10% dos custos totais de um sistema fotovoltaico, e a tendência é de queda no preço desses componentes nos próximos anos. Os custos de produção deste mercado são definidos, basicamente, pela posição geográfica, definindo a capacidade de distribuição, a escala produtiva e os investimentos em tecnologia e inovação (ABINEE, 2012).

A fabricação de inversores, em especial, possui uma cadeia produtiva bastante ramificada, inclusive com compartilhamento da linha de produção para outros dispositivos eletrônicos. A capacidade produtiva de inversores no mundo é da ordem de 45 GW por ano, incluindo outros usos que não o fotovoltaico (IMS RESEARCH, 2009 *apud* ABINEE, 2012), e apesar de caracterizado por ser mais ramificado que os demais elos da cadeia, em 2009 quatro empresas respondiam por 60% da produção mundial. Entretanto, seguindo a tendência dos produtores de módulos e células fotovoltaicas, os fabricantes de inversores estão num intenso processo migratório para a China, devido à reduzida estrutura de custos do país.

As baterias e controladores de cargas são produzidos por empresas que, de uma maneira geral, não focam exclusivamente no mercado fotovoltaico. Ocorre, na realidade, o inverso: as empresas adaptam seus produtos para atuação nos sistemas de geração de energia, muitas vezes com prejuízos técnicos.

Dessa forma, a capacidade de produção e principais comercializadores destes componentes é flexível. A indústria de componentes é bastante pulverizada e não necessariamente dedicada à indústria fotovoltaica. Ainda assim, certos componentes possuem especificações próprias para utilização no setor, exigindo certa escala produtiva para viabilização de uma planta dedicada (ABINEE, 2012).

### **3.1.6 Empresas de consultoria e projetos e empresas especializadas em manutenção e controle operacional**

As empresas prestadoras de serviços de consultoria e projetos, juntamente com as especializadas em instalação dos equipamentos e assistência técnica são, em sua maioria, de pequeno e médio porte, com uma atuação restrita à região onde se localizam.

O conjunto de empresas desse setor é caracterizado por alta empregabilidade de profissionais qualificados, atuantes desde o planejamento até execução dos projetos. A quantidade de empregos gerados pela indústria fotovoltaica é significativa quando comparada às outras fontes. A maior parte dos empregos é concentrada em empresas de instalação dos sistemas (CARVALHO, MESQUITA e ROCIO, 2014).

Em todo o mundo, essas micro e pequenas empresas vêm se multiplicando, de acordo com o desenvolvimento da demanda. Os entraves para entrada nesse mercado são pequenos e requerem baixos investimentos, relativos aos demais elos da cadeia.

Entretanto, segundo Kupfer *et al* (2012), há casos de verticalização também nessa fase, a depender do tamanho do empreendimento: em projetos de maior capacidade, as empresas produtoras de módulos podem ser responsáveis pela instalação dos sistemas fotovoltaicos.

### 3.2 Considerações sobre a cadeia produtiva da energia fotovoltaica

A cadeia produtiva da energia fotovoltaica é caracterizada por ser bastante heterogênea. Enquanto a produção de silício metalúrgico e silício grau solar é dominada por um pequeno grupo de produtores, especificamente em poucos países do mundo, a jusante da cadeia tem-se setores como o de produção de *wafers* e células mais desconcentradas, com um número maior de empresas atuantes e distribuição geográfica, mas diversificada.

A produção de módulos e painéis é ainda mais descentralizada, embora sejam praticadas também verticalizações nas empresas. Por fim, as empresas especializadas em serviços tecnológicos de projetos e manutenção são bastante regionalizadas, em geral de pequeno porte e, por consequência, realizando seus serviços mais próximos dos clientes, adequando-se às necessidades de cada projeto e as variações mercadológicas em cada região.

Tem-se, também, as empresas produtoras dos componentes eletrônicos que complementam os sistemas, tratando-se de um setor compartilhado com o mercado de eletrônicos em geral e empresas somente adaptadas ao setor fotovoltaico.

O quadro 3.2 demonstra um dos fatores que leva à essa heterogeneidade na cadeia produtiva: as necessidades de capital para entrada nos setores de produção do silício são elevadas, comparando-os aos requerimentos médios para investimento em capacidade de produção de módulos fotovoltaicos, restringindo o número de players no início da cadeia.

Linha de montagem	Capacidade (MW)	Custo (US\$ milhões)
Silício grau solar	500	250
Wafer	50	40
Células	25	15
módulos	10	2

Quadro 3.2 - Custos de capital para a instalação de plantas produtivas de escala economicamente viável, 2008 (em US\$ milhões). Fonte: CTI (2011 *apud* Kupfer *et al*, 2012), adaptado.

Segundo Carvalho, Mesquita e Rocio (2014), a cadeia produtiva da energia fotovoltaica é, no geral, pouco verticalizada, com fluxo importante de comércio entre as diversas etapas, o que é refletido na alternância de posição das empresas entre as líderes de produção em cada etapa. A cadeia, num reflexo direto da situação do setor, vem sofrendo com uma crescente competitividade e busca por redução dos custos no mundo todo, o que vêm levando as empresas à migrarem para países asiáticos, mais propensos à novas tecnologias devido aos incentivos governamentais.

## **CAPÍTULO 4 - A CADEIA PRODUTIVA DO SETOR FOTOVOLTAICO NO BRASIL**

Uma vez identificada e detalhada a estrutura da cadeia produtiva genérica da energia fotovoltaica, busca-se, neste tópico, identificar a estrutura da cadeia do setor no Brasil, a capacidade produtiva de cada elo da cadeia, o número de empresas atuantes e as oportunidades para a consolidação da energia fotovoltaica no país.

### **4.1 Produção de silício metalúrgico**

O Brasil possui as maiores reservas mundiais de quartzo. O minério, utilizado para obtenção do silício metalúrgico, é encontrado no território brasileiro em alta qualidade. Assim, além de obter a principal matéria-prima em abundância, a qualidade do quartzo faz do Brasil um dos países mais promissores no setor.

De fato, o país ocupa uma das melhores posições no âmbito global: A capacidade de produção anual brasileira é de cerca de 170 milhões de toneladas, correspondendo à 8% da produção mundial em 2013 (CARVALHO, MESQUITA e ROCIO, 2014).

São cinco empresas produtoras no país, mas a capacidade produtiva brasileira é, basicamente, concentrada em quatro grandes empresas: A Globe Metais (Dow Corning), Rima, Liasa e a Minasgás. Além dessas, existe a CBCC. Com exceção da Globe Metais, que se localiza no estado do Pará, todas estão localizadas em Minas Gerais. A produção anual é distribuída conforme a figura 4.1.

A Globe Metais produz silicone, além do silício metalúrgico. A Rima e a Minasligas produzem, além do silício metalúrgico, ferrosilício e outras ligas ferrosas, enquanto que a Liasa é especialista em silício metalúrgico, sendo esse seu único produto (BAIN & COMPANY e GAS ENERGY, 2014).



Figura 4.1 - Produtores de silício metálico no Brasil em 2012 (mil toneladas). Fonte: Bain & Company e Gas Energy, 2014.

Entretanto, apesar das condições favoráveis e da alta produção, o silício metálico não é aproveitado no Brasil: 85% do que é produzido no território nacional é destinado à exportação, visto a baixa demanda desse material no mercado interno. A única aplicação do silício metálico no Brasil é na metalurgia, com baixo consumo aparente, representando 15% da produção local (BAIN & COMPANY e GAS ENERGY, 2014).

Outro fato importante é que, no Brasil, o carvão utilizado para obtenção do silício metálico é o vegetal, em desacordo com o empregado em países como China e Estados Unidos. Entretanto, segundo Galdino e Lima (2014), não está claro se há vantagem ou desvantagem, visto que o carvão vegetal, utilizado localmente, é mais caro, porém fornece vantagem no processo produtivo por ser mais puro.

Assim, o país se caracteriza como um dos maiores produtores de silício metálico do mundo e capaz de atender a possível demanda da cadeia produtiva da energia fotovoltaica, no processo de sua consolidação. Além da abundância da matéria prima e da alta qualidade do minério quartzo, a produção nesse setor se faz rígida e consolidada.



## 4.2 Produção de silício grau solar

No Brasil não existe, até o momento, produção de silício grau solar em escala industrial. Essa situação ocorre porque não há tecnologia brasileira para produção de silício grau solar utilizando a rota química de purificação, praticada nos países produtores. Além de demandar elevados investimentos e alta tecnologia, esse processo é caracterizado por ter altos custos de produção.

Dois fatores são bastante impactantes nesse aspecto: Os impostos da atividade e, principalmente, o custo da eletricidade no Brasil. O processo de purificação do silício possui uma alta demanda de energia elétrica. Logo, considerando que o custo da eletricidade no Brasil é superior ao praticado nos demais países produtores de silício, conforme exposto na figura 4.2, essa atividade pela rota química ainda não é economicamente viável no Brasil.

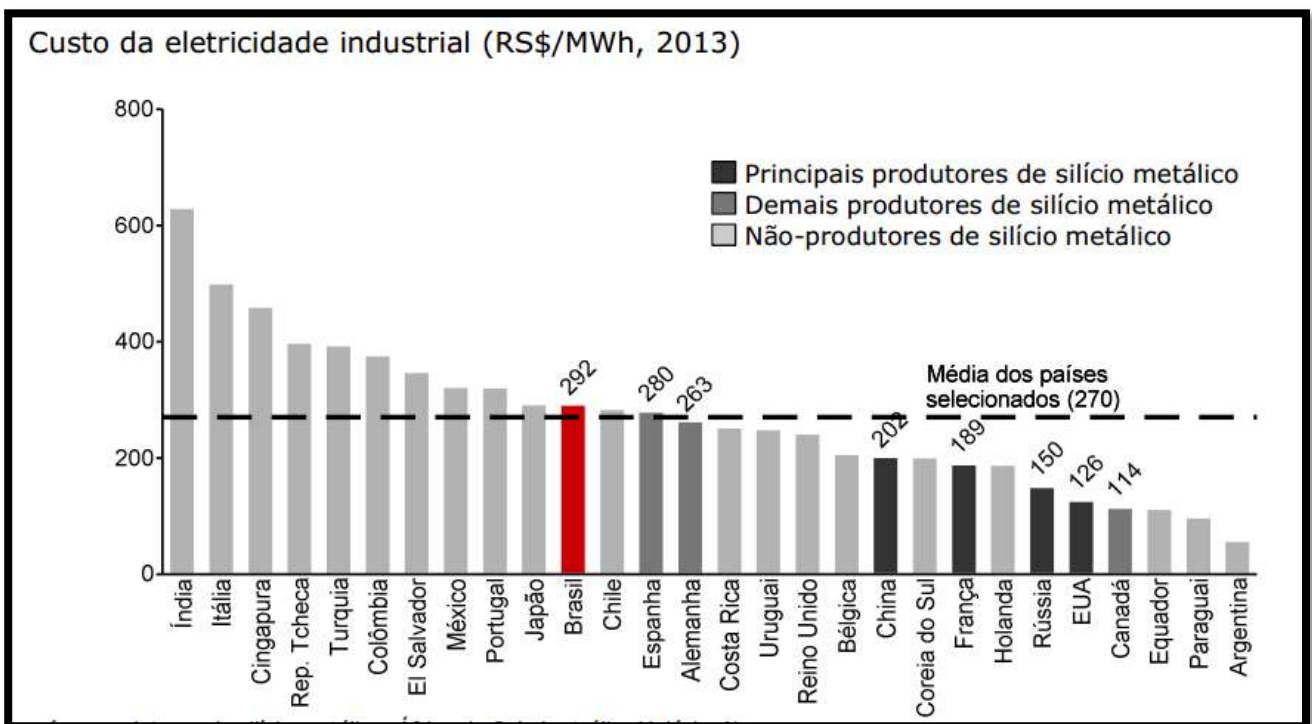


Figura 4.2 - Custo da eletricidade industrial (R\$/MWh, 2013). Fonte: Bain & Company e Gas Energy, 2014.

Entretanto, apesar das adversidades do setor e atual inviabilidade da atividade no Brasil, está em desenvolvimento no país a técnica de purificação do silício por rota metalúrgica. Conforme citado anteriormente, trata-se de um processo alternativo de obtenção do silício com pureza suficiente para aplicações em células fotovoltaicas.

Desde 2010, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) vem desenvolvendo pesquisa visando esse objetivo. Destaca-se também iniciativas da empresa Minasligas, Rima e BNDES, em parcerias que investem em pesquisas nessa tecnologia. A Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), em parceria com a empresa Tecnometal, também está realizando testes de purificação por rota metalúrgica.

Ademais, pesquisas realizadas na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), em acordo com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel/Eletrobrás) já produzem silício a partir da rota metalúrgica, inclusive com a fabricação de painéis com eficiência superior aos encontrados no mercado.

Segundo Carvalho, Mesquita e Rocio (2014) há, no país, expectativa de implantação de unidades produtoras de silício grau solar, nos próximos anos, de cerca de oitocentas toneladas ao ano. Inicialmente, deverão ser feitos investimentos em plantas-piloto comerciais de até cem toneladas ao ano, para ajustes e adaptações dos processos desenvolvidos a partir dos resultados de pesquisas que estão sendo desenvolvidas.

Essa tecnologia, caso se estabeleça e ganhe escala industrial, poderá viabilizar a iniciativa de purificação do silício em grau solar no país e inseri-lo no restrito grupo de países atuantes nesse elo da cadeia. Para tanto, faz-se necessário investimento em pesquisa e desenvolvimento, além de incentivos fiscais buscando redução dos custos de uma eventual produção brasileira e incentivos para o surgimento de uma demanda que justifique tais investimentos.

### **4.3 Produção de células fotovoltaicas**

A produção de células fotovoltaicas no Brasil em escala industrial é inexistente. Isso porque a falta de tecnologia produzida em solo brasileiro continua sendo um dos principais entraves ao desenvolvimento. Toda a demanda de células fotovoltaicas no país é atendida por importação, principalmente dos países asiáticos, como o Japão e a China.

Há somente produções em escala experimental em laboratórios, como o Núcleo Tecnológico de Energia Solar (NT-Solar), da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), que além de desenvolver e fabricar as células e módulos fotovoltaicos, o NT-Solar também produz o equipamento que torna possível sua produção. Entretanto, não há empresas que produzam células fotovoltaicas para fins comerciais.

#### 4.4 Produção de módulos e painéis FV

O Brasil conta com uma empresa fabricante de módulos solares. Trata-se da Dya Energia Solar, do grupo Tecnometal. A empresa é relativamente nova, começou suas operações em 2010, possui uma capacidade anual de 25MWp de módulos fotovoltaicos de silício por ano e está situada em Campinas, São Paulo.

Como o Brasil não produz células fotovoltaicas, matéria prima imediata para a produção dos módulos, a empresa importa este material e realiza as ligações e montagens no território brasileiro. Entretanto, Carvalho, Mesquita e Rocio (2014) destacam que esse pode ser o início da cadeia produtiva brasileira, a exemplo do ocorrido na China, que iniciou sua produção pelas etapas finais da cadeia e atualmente lidera o mercado mundial.

No que tange os painéis solares, o Brasil possui duas empresas produtoras: A própria Dya Energia Solar, da Tecnometal, e a Globo Brasil, na cidade de Valinhos, São Paulo. A Globo Brasil, inaugurada em 2015, possui uma capacidade instalada de 2.000 painéis solares ao dia, 180MWp ao ano, representando um acréscimo de mais de 7 vezes a capacidade produtiva brasileira até então. Assim, a capacidade produtiva brasileira é de aproximadamente 205MWp de painéis solares por ano.

Há ainda no Brasil o processo de inserção de novas empresas: a multinacional chinesa BYD Energy, do Grupo BYD, atuante nos segmentos de energia e veículos elétricos, anunciou em maio de 2015 que instalará uma unidade para fabricação de painéis fotovoltaicos na cidade de Campinas, São Paulo. A empresa planeja, com essa nova unidade no Brasil, produzir 400MWp por ano e será a terceira empresa produtora de módulos e painéis, aumentando a capacidade produtiva do elo da cadeia brasileira e contribuindo para a consolidação do setor no país.

Além disso, também em 2015, a empresa Intéling também anunciou uma fábrica de painéis fotovoltaicos, na cidade de Bento Gonçalves, no Rio Grande do Sul. Apesar de declarar o montante investido, R\$ 60 milhões, não foram divulgados detalhes de capacidade de produção. Entretanto, a notícia de instalação de mais uma empresa colabora para o cenário de otimismo do setor.

Outros grupos também demonstram interesse em instalar linhas de produção de módulos e painéis no Brasil, caso as condições se tornem mais favoráveis. São exemplos as empresas Oerlikon, SunPower, Saint-Gobain e CEA-Liten.

Entretanto, a grande dificuldade brasileira para estabelecer uma produção efetiva de células, módulos e painéis fotovoltaicos é atingir uma estrutura de custos que seja competitiva, em relação ao que se obtém internacionalmente, particularmente nas plantas asiáticas, e ainda obter retorno (ABINEE, 2012).

#### **4.5 Empresas produtoras dos demais componentes**

Este setor no Brasil é semelhante ao mundial: diversificação de empresas, atuando em outros setores, atendendo com adaptações a demanda dos sistemas fotovoltaicos. Nela, encontram-se produtores de baterias, conectores, estruturas de alumínio, produtores de vidros e cabos de energia.

O Brasil já possui, em território nacional, fábricas de acumuladores de energia e de conversores. Com o devido estímulo, esses produtos podem ser adaptados a fim de atender às exigências específicas dos sistemas solares fotovoltaicos.

De acordo com os relatórios de componentes fotovoltaicos do INMETRO (2015), para a produção de inversores de sistemas fotovoltaicos, apresentam-se sete fabricantes: seis produzem modelos para sistemas conectados à rede (on grid), a saber: B&B Power, PHB, Duraluxe, Solar energy, Fronius e SAJ Solar Inverter. Para a fabricação de inversores de sistemas isolados, o país conta com um fabricante, a Unitron. No entanto, as capacidades produtivas dessas empresas não foram especificadas.

#### **4.6 Empresas prestadoras de serviços: Consultoria, instalação e suporte técnico**

Este grupo apresenta um maior grau de desenvolvimento na cadeia produtiva no Brasil, com um grande número de empresas atuantes. De acordo com a cadeia global, também no território brasileiro este setor é dominado por pequenas e médias empresas, de atuação regional. Tais empresas necessitam de baixos investimentos iniciais: em geral, em equipamentos para projeção e instalação.

Segundo o Mapa de Empresas do Setor Fotovoltaico, do Instituto Ideal em parceria com a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, GIZ e KfW, no Brasil existem hoje cerca de 815 empresas especializadas nesses serviços especializados no setor fotovoltaico, distribuídas em todo o território nacional (AMERICADOSOL, 2015).

O elevado número de empresas e sua distribuição no país constituem esse elo da cadeia também como rígido e capaz de atender à demanda nacional e a possibilidade de crescimento dela. As limitações encontram-se na falta de profissionais qualificados para o setor, principalmente de nível superior, e a pouca experiência técnica.

#### **4.7 Síntese da cadeia produtiva brasileira**

A figura 4.3 sintetiza as informações sobre a estrutura da cadeia produtiva equipamentos fotovoltaicos no Brasil. Nela, pode-se observar uma característica própria da cadeia produtiva brasileira: uma atuação efetiva nos elos mais extremos da cadeia, produção de silício metalúrgico e empresas de consultorias, projeção e manutenção. Todavia, a produção de silício grau solar, células, módulos e painéis solares são em volumes reduzidos, quando não são inexistentes.

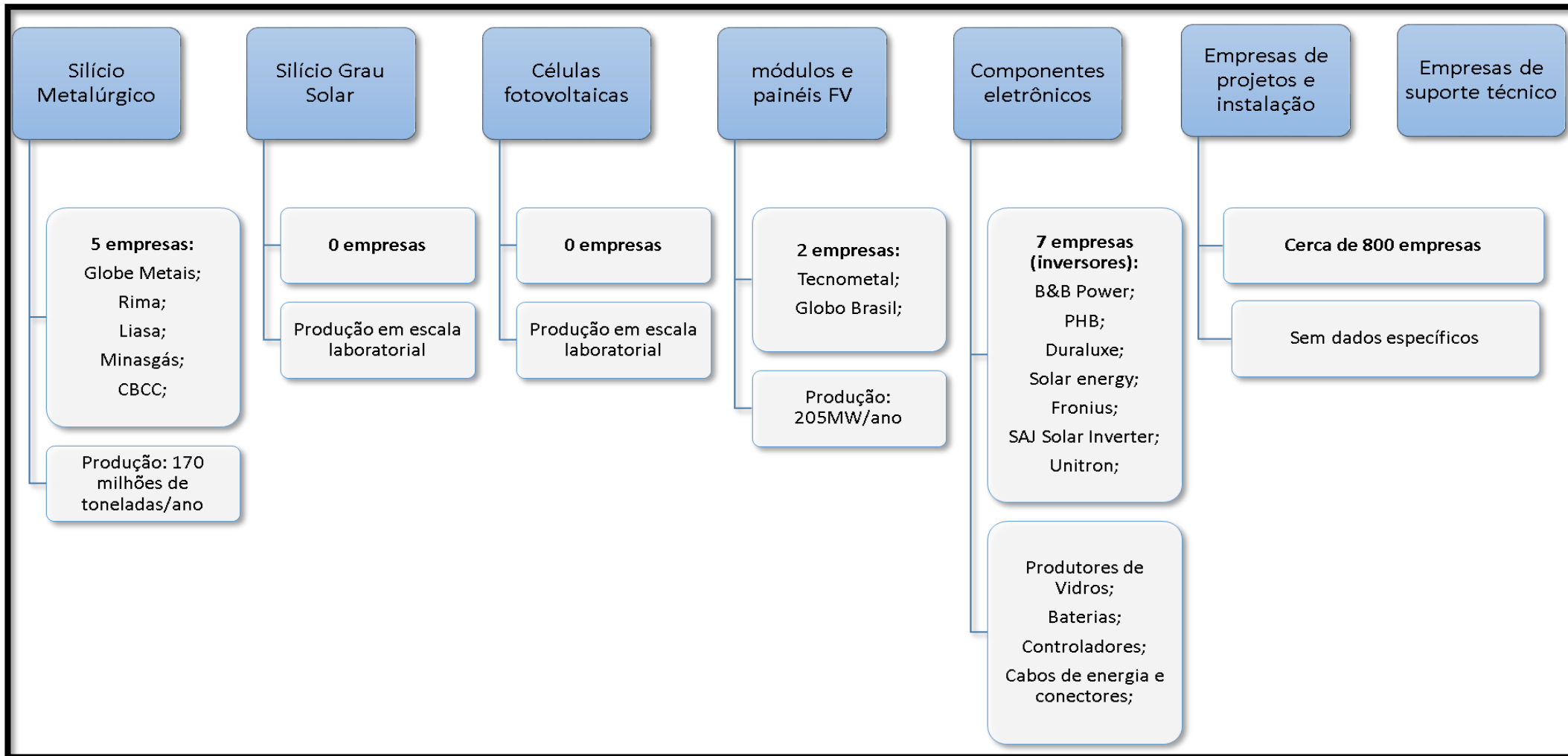


Figura 4.3 - Estrutura empresarial por elo da cadeia de equipamentos fotovoltaicos no Brasil. Fonte: Elaboração própria.

## **CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Este capítulo apresenta uma análise dos resultados encontrados sobre o estado da cadeia produtiva fotovoltaica no Brasil: as dificuldades encontradas e oportunidades presentes em cada elo da cadeia.

### **5.1 Produção de silício metalúrgico**

Na produção de silício grau metalúrgico, observa-se que o Brasil ocupa posição de destaque mundial. A principal matéria prima, o quartzo, é encontrada no território nacional em quantidade e qualidade para que o país seja um dos principais atores desse setor, sendo um dos poucos elos da cadeia produtiva que o país não apresenta grandes dificuldades.

Na verdade, o inverso ocorre: a produção nacional é, em sua maioria, exportada, e pode facilmente ser explorada para uma produção nacional do silício grau solar. Entretanto, a situação positiva brasileira ainda apresenta alguns desafios: o crescente custo da eletricidade industrial no país e os elevados encargos podem ser considerados duas ameaças ao setor.

Dessa forma, a capacidade de produção de silício grau metalúrgico no país se caracteriza como uma oportunidade a ser explorada pelos demais atores da cadeia produtiva fotovoltaica.

### **5.2 Produção de silício grau solar**

A produção de silício grau solar no Brasil, conforme já discutido, é inexistente. Há apenas iniciativas de pequeno volume em nível laboratorial. A matéria prima principal – o silício metalúrgico – está presente em abundância no país. O desafio desse setor é reduzir os custos de purificação do silício metalúrgico para produção nacional. O custo de eletricidade, em especial, deve ser tratado, visto que o processo de purificação do silício metalúrgico, demandada em alta quantidade, é peça-chave nesse aspecto.

Uma oportunidade para o país é o desenvolvimento da tecnologia de purificação por rota metalúrgica, que por ser um processo mais simplificado, possui menor demanda de eletricidade. Nessa perspectiva, o processo de produção do silício grau solar por rota metalúrgica, caso venha a se estabelecer como uma alternativa viável para o processo tradicional – a rota química – representará um avanço tecnológico brasileiro e uma maneira de produção com preços competitivos.

Estima-se uma capacidade fotovoltaica de 2 GWp, instalada nos próximos dez anos no Brasil, que representaria uma demanda em torno de 12 mil toneladas de silício grau solar no período. Considerando um preço médio de US\$ 20,00 a 25,00/kg, tratar-se-ia de um mercado de US\$ 240 milhões-US\$ 300 milhões e um volume de cerca de 1,2 mil toneladas ao ano (CARVALHO, MESQUITA e ROCIO, 2014), demonstrando a dimensão da oportunidade para o país no desenvolvimento desse elo da cadeia.

### **5.3 Produção de células fotovoltaicas**

No tocante à produção de células fotovoltaicas no país, também inexistente, o grande desafio é alcançar custos competitivos internacionalmente de produção, principalmente equiparáveis aos preços praticados pelos modelos asiáticos, que atualmente compõem a maior parte dos produtos importados para atender o mercado brasileiro.

Uma oportunidade é buscar incentivos fiscais para reduzir os custos. Além disso, buscar incentivar o consumo interno, em detrimento ao volume de células importadas do mercado asiático, que justificaria os investimentos em implantação de unidades formadoras de capacidade produtiva brasileira deste elo da cadeia. Com uma produção nacional ativa e operante, apareceria também os ganhos por produção em escala e curva de aprendizado.

### **5.4 Produção de módulos e painéis**

A produção de módulos e painéis solares no Brasil situa-se em um estágio mais desenvolvido, se comparando com a produção de silício grau solar e células fotovoltaicas, pois já possui empresas atuantes no país. Com uma capacidade produtiva já instalada e operante, os desafios agora são para, mais uma vez, redução dos custos, visando uma competitividade no âmbito global. Uma oportunidade do setor é, também, economias de escala e curva de aprendizado, além de reduções nos encargos setoriais.

### **5.5 Produção de inversores e demais componentes**

A produção de inversores também apresenta sinais de desenvolvimento, já existe uma quantidade considerável de empresas atuantes. Entretanto, esse setor apresenta dificuldades principalmente no que tange à estrutura tributária, custos de produção e necessita de adequações facilitando a competitividade e surgimento da demanda interna em detrimento ao volume importado desses produtos (ABINEE, 2012).



Uma oportunidade seria uma demanda mais consistente, também nesse elo da cadeia, pois geraria ganhos de redução dos custos por volume produzido e curvas de aprendizado.

A indústria dos demais componentes, complementares do sistema, possui empresas com uma produção já definida e maleável para atender a demanda do setor fotovoltaico, não apresentando maiores dificuldades para atender à demanda nacional.

## **5.6 Empresas prestadoras de serviços: Consultoria, instalação e suporte técnico**

A característica principal do setor das empresas prestadoras de serviços de consultoria, projetos e posterior suporte técnico é a quantidade de empregos gerados. Esse benefício é ainda maior, quando considerado o fato de que as regiões com maior irradiação solar e, portanto, com maior potencial energético do país, serem, em muitos casos, regiões com baixo nível de desenvolvimento econômico e escassez de empregos.

Dessa forma, além de contribuir para a matriz energética brasileira, a consolidação da cadeia produtiva e expansão do número de empresas prestadoras de serviços do setor fotovoltaico contribuiria, também, para a geração de empregos e desenvolvimento socioeconômico de regiões carentes brasileiras, sendo essa uma oportunidade desse elo da cadeia.

Outra oportunidade desse grupo é que os projetos brasileiros ainda são, em sua grande maioria, de micro usinas de geração de energia solar fotovoltaica. Tais projetos, pela dimensão e ganhos obtidos, não atraem grandes empresas multinacionais. Assim, o mercado se mostra propício ao desenvolvimento de empresas nacionais e geração de empregos no âmbito regional de atuação, sendo mais um ponto positivo do setor.

Um desafio para o setor é a falta de mão de obra qualificada e a inexperiência com projetos, devido ao estado de desenvolvimento da geração fotovoltaica no país. Em uma pesquisa realizada em 2013 com empresas de instalação e suporte técnico, realizada pelo Instituto para o desenvolvimento de energias alternativas na América Latina -IDEAL, das 90 empresas que completaram a pesquisa, 53 (59%) afirmaram que não finalizaram a instalação de nenhum sistema fotovoltaico de micro ou mini geração em 2013 (KOZEN; MANOEL, 2014).

A precisão na elaboração de projetos, execução, instalação ou manutenção é essencial, visto que erros nessas etapas como, por exemplo, instalação inadequada, poderá comprometer toda a eficiência projetada e requerer reinstalação, gerando custos e retrabalhos. Portanto, mão de obra qualificada e experiência no setor se faz essencial e um desafio desse elo da cadeia.

## CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil é considerado um dos países com melhores condições para geração de energia fotovoltaica. Os ótimos níveis de irradiação solar apresentados no território nacional e as extensas terras disponíveis para implantação de geração concentrada, além da possibilidade de geração descentralizada em telhados de casas, prédios e indústrias, são destaques, comparando com situações apresentadas em outros países mais desenvolvidos no setor. Apesar disso, o país apresenta uma baixa capacidade instalada de geração de energia em relação a outros países em condições menos favoráveis, como os países da Europa, China e Japão.

Essa disparidade entre a capacidade de geração de energia fotovoltaica e o estado atual no país justifica-se, principalmente, pelo fato de que o preço de instalação de sistemas fotovoltaicos continua elevado no país. Uma das soluções para esse entrave é a instalação de uma cadeia produtiva nacionalizada, capaz de fornecer produtos e serviços com preços competitivos internacionalmente e tornar a tecnologia economicamente viável.

Entretanto, observa-se que a cadeia produtiva da energia fotovoltaica brasileira se encontra, ainda, em fase de desenvolvimento inicial. Ela é caracterizada pela efetiva presença de empresas atuantes nos elos extremos da cadeia: a produção de silício metalúrgico e empresas de consultoria e suporte técnico. Mas a produção de silício em grau solar e células fotovoltaicas é praticamente inexistente. Além disso, há poucas empresas produtoras de módulos solares, com capacidades reduzidas.

Tais setores apresentam dificuldades que devem ser superadas e algumas oportunidades que poderão proporcionar ao Brasil a efetiva exploração de seu potencial energético fotovoltaico. Entre os entraves para o desenvolvimento dessa cadeia, destacam-se: a inexistência de uma demanda nacional pelo produto final, os elevados custos de produção em todos os elos da cadeia, os elevados custos dos insumos de produção no país – principalmente a energia elétrica –, o estado ainda inicial da tecnologia de purificação do silício por rota metalúrgica e a estrutura tributária brasileira no setor.

O incentivo à pesquisa é uma das soluções possíveis para o desenvolvimento do setor no país, pois o incremento tecnológico poderá proporcionar o atingimento de uma estabilidade na purificação do silício metalúrgico por rota metalúrgica, com preços mais equiparados aos praticados no mercado internacional, dando condições de competitividade ao Brasil nesse elo da cadeia e atraindo investimentos em capacidade produtiva.

Ainda, são sugestões novas pesquisas no setor um estudo que detalhe as necessidades para consolidação da cadeia produtiva fotovoltaica no nordeste brasileiro e uma pesquisa que analise como será a coordenação de uma cadeia produtiva fotovoltaica no Brasil.

Além disso, políticas e ações que incentivem a demanda, como planos de compensação benéficos aos usuários, planos de financiamento dos investimentos e redução dos encargos nos produtos nacionais, são necessários. Dessa forma, ganhos por volume de produção e curvas de aprendizado contribuirão para redução dos custos de produção, aumento da competitividade, disponibilidade e, conseqüentemente, fortalecimento da cadeia produtiva nacional.

As recentes iniciativas do governo federal brasileiro para incentivar uma demanda nacional dos produtos fotovoltaicos devem ser consideradas, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), de 2004 e, mais recentemente, os leilões voltados para contratação de sistemas de geração de energia fotovoltaica. Entretanto, faz-se necessário uma atuação mais efetiva no setor, visando o aumento do consumo interno e melhores condições de atuação perante o mercado mundial.

Além dos benefícios de diversificação da matriz energética brasileira com a utilização de mais uma fonte renovável, para o Brasil, obter uma cadeia produtiva de energia fotovoltaica bem desenvolvida e estruturada representa gerar emprego e renda, apoiar o desenvolvimento tecnológico e científico do país, atrair investimentos nacionais e estrangeiros e reduzir os impactos ambientais da geração de energia por fontes não-renováveis, acompanhando a tendência mundial.

## REFERÊNCIAS

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Brasil. Junho de 2012.

ASSUNÇÃO, Delgado H. **Degradação de módulos fotovoltaicos de silício cristalino instalados no DEE-UFC**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2014.

ALSEMA, Erik A. WILD-SCHOLTEN, Mariska J. **Environmental Impacts of crystalline Silicon Photovoltaic Module Production**. 13º CIRP Intern. Conf. on Life Cycle Engineering, Leuven, maio/junho de 2006.

KUPFER, David *et al.* **Avaliação Das Perspectivas De Desenvolvimento Tecnológico Para A Industria De Bens e Capital Para Energia Renovável (PDTS-IBKER)**. Agência Brasileira de Desenvolvimento industrial – ABDI. Relatório de Pesquisa. Rio de Janeiro, 2012.

AMERICADOSOL.ORG. **Mapa de empresas do setor fotovoltaico**. Disponível em: <http://www.americadosol.org/fornecedores/>. Acessado em: 09 de nov. 2015.

AMÉRICA DO SOL. Mercado Mundial: **O Sol Gerando Empregos**. Disponível em: <http://www.americadosol.org/mercado-mundial/>. Acessado em: 04 de nov. 2015.

BAIN e COMPANY; GAS ENERGY. **Potencial de diversificação da indústria química: Derivados de silício**. 2014. 1º Edição. Editora Bain e Company. Rio de Janeiro, 2014.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Relatório Técnico 60: Perfil de Ferroligas**. Relatório. Brasília, agosto de 2009.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC. **Conceituação: Cadeia Produtiva**. 2015. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=2&menu=3252>. Acessado em: 09 de nov. 2015.

BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. **Dispõe sobre a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) e dá outras providências**. Brasília, 26 de abril de 2002.

BRASIL. Secretaria Estadual da Agricultura e Abastecimento - SEAB. **Relatório Agropecuário Safra 1996-1997**. Curitiba, Paraná. 1998.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário estatístico do setor metalúrgico**, 2011.

BRETAS, V. **É a vez da energia solar?** Cada vez mais gente acha que sim. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/revista-exame/edicoes/109202/noticias/e-a-vez-das-solares>. Acessado em: 03 de nov. 2015.

BURGER, Bruno *et al.* **Photovoltaics Report**. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE e PSE AG. Freiburg, novembro de 2015. Disponível em: [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de). Acessado em: 05 de nov. 2015.

CARNEIRO, Joaquim. **Electromagnetismo B Módulos Fotovoltaicos**. Características e Associações. Departamento de física, Universidade de Minho. Guimarães, 2010.

CARVALHO, Pedro S. L., MESQUITA, Pedro P. D., ROCIO, Marco A. R. **A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?** Biblioteca BNDES Setorial 40, p. 205-234. 2014.

CARVALHO, Renata de. **Por dentro da energia solar: o papel do silício**. Disponível em: <http://blog.solargrid.com.br/blog/por-dentro-da-energia-solar-o-papel-do-sil%C3%ADcio>. Acessado em: 09 de nov. 2015.

CASTRO, Antônio M. G., LIMA, Suzana M. V., CRISTO, Carlos M. P. **Cadeia produtiva: Marco Conceitual para Apoiar a Prospecção**. XXII Simpósio de Gestão e Inovação tecnológica. Salvador, Bahia. Novembro de 2002.

COX, J.F., BLACKSTONE, J.H. e SPENCER, M.S. **APICS Dictionary** (8a. edição). American Production and Inventory Control Society. Falls Church, 1995

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral** / Coordenadores Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília: DNPM, 2014. 141 p. ISSN 0101 2053. Março de 2015.

ESPOSITO, Alexandre S. FUCHS, Paulo G. **Desenvolvimento do mercado de energia fotovoltaica no Brasil**. P. 1-16. Revista do BNDES 40, dezembro 2013. Disponível em: [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev4003.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev4003.pdf). Acessado em: 09 de nov. 2015.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil** – Condicionantes e Impactos. NOTA TÉCNICA DEA 19/14. Rio de Janeiro. Outubro de 2014.

FARIAS, David Berto. **Estudo Do Processo De Purificação Do Silício Grau Metalúrgico Na Fabricação De Células Fotovoltaicas**. Centro Universitário Fundação Santo André. Santo André, 2013.

FOGAÇA, Jennifer R. R. **"Silício"**; Brasil Escola. Disponível em: <http://www.brasilecola.com/quimica/silicio.htm>. Acesso em 04 de novembro de 2015.

GALDINO, M. A. e LIMA, J. H. G. PRODEEM - **O Programa Nacional de Eletrificação Rural Baseado em Energia Solar Fotovoltaica**. CEPTEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Congresso Brasileiro de Energia 2002.

GALDINO, Marco A. PINTO, João T. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPTEL –CRESESB, Rio de Janeiro. Março de 2014.

GERHARDT, Tatiana E. SILVEIRA, Denise T. **Métodos de Pesquisa**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1º Edição, 2009, 120p. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GLOBE SPECIALTY METALS. *Investor's day*, 2013. Disponível em: <http://files.shareholder.com/downloads/ABEA3CRU4N/2972701697x0x706527/3d510657-a2bb-4e6e-a7bc-b41087bae4ff/gsm%20investor%20presentation%20%20November%202013.pdf>. Acessado em: 30 de out. 2015.

HASENCLEVER, L. KUPFER, David. **Economia Industrial. Fundamentos Teóricos e Práticas no Brasil**. Rio de Janeiro/RJ. Editora Campus, 2002.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Tabelas de Consumo / Eficiência Energética - Componentes Fotovoltaicos - Inversores Conectados à Rede (On Grid)** - Edição 10/15. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/componentes\\_fotovoltaicos\\_Inversores\\_On-Grid.pdf](http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/componentes_fotovoltaicos_Inversores_On-Grid.pdf). Acessado em: 10 de nov. 2015.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Tabelas de Consumo / Eficiência Energética - Componentes Fotovoltaicos - Inversores redes autônomas (Off Grid)** - Edição 10/15. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/componentes\\_fotovoltaicos\\_Inversores\\_Off-Grid.pdf](http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/componentes_fotovoltaicos_Inversores_Off-Grid.pdf). Acessado em: 10 de nov. 2015.

KONZEN, Gabriel. MANOEL, Paula S. **O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica em 2013**. Instituto para o desenvolvimento de energias alternativas na américa latina (IDEAL). 43 f. Novembro de 2014.

LEVA, Flávia Fernandes de, SALERNO, Carlos Henrique, CAMACHO, José Roberto. **Modelo de um projeto de um sistema fotovoltaico**. Encontro De Energia No Meio Rural, 5, 2004, Campinas. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022004000200020&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200020&lng=en&nrm=abn). Acessado em: 10 nov. 2015.

LEE, H. L.; BILLINGTON, C. **Material management in decentralized supply chain**. Operational research, v. 41, nº5, 1993.

MASSON, Gaëtan. ORLANDI, Sinead. REKINGER, Manoël. **Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018**. European Photovoltaic Industry Association. Bruxelas, Bélgica, 2014.

MCCRONE, A. *et al.* **Global trends in renewable energy investment 2015**. Frankfurt: Frankfurt School; Unep Centre; Bloomberg, 2015.

MENTZER, J. T; DEWITT, W.; KEEBLER, J.; MIN, S.; NIX, N; SMITH, C.; ZACHARIA, Z.; **Defining supply chain management**. *Journal of Business Logistics*, v. 22, nº2, 2001.



MIELKE, Eduardo J. C. **Análise Da Cadeia Produtiva E Comercialização Do Xaxim, Dicksonia sellowiana**, 2002. 74 f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais). Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

NASCIMENTO, Cássio A. **Princípio De Funcionamento Da Célula Fotovoltaica**. Monografia (Pós-graduação lato-sensu em Fontes alternativas de Energia). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2004.

NETO, João A. **Análise de investimento para seleção de alternativas de transportes logísticos: uma abordagem informacional em uma empresa do setor de carcinicultura do RN**. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2012.

OLIVEIRA, Ilane M. P. **Estudo de Viabilidade Econômica Para Inserção da Tecnologia De Conversão Do Gás Natural Adsorvido (GNA)**. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

PAIVA, L. **Customização de Produtos e a Cadeia de Suprimento**. Logisticando. Disponível em: < <http://ogereente.com/logisticando/2007/06/24/customizacao-de-produtos-e-a-cadeia-de-suprimento/>>. Acessado em: 09. Nov. 2015.

PLATONOW, Vladimir. **Energia solar terá leilão superior ao que vai ser gerado por Belo Monte**. Disponível em: <http://www.ebc.com.br/noticias/economia/2015/05/energia-solar-tera-leilao-superior-ao-que-vai-ser-gerado-por-belo-monte>. Acessado em: 09 de out. 2015.

PIRES, Sílvio R. I. **Gestão da cadeia de suprimentos (Supply chain management)**. Conceitos, estratégias, práticas e casos. Editora Atlas, 2º Ed. 336 f. 2009

PORTAL INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Brasil obtém silício purificado para células solares**. Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=brasil-obtem-silicio-purificado-celulas-solares#.VkJG7PmrTDd>. Acessado em: 09 de nov. 2015.

PHOTON INTERNATIONAL. **The Solar Power Magazine**, 2011. Vários números. Disponível em: <http://www.photon-international.com/>. Acessado em: 03 de set. 2015.

REN21 - **Renewables Energy Policy Network for the 21th century**. RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT. REN21 Secretariat, Paris, France. 2015.

RIBEIRO, Arthur. **Preço ao nível da energia fóssil e aquecimento global fazem disparar a procura da indústria de painéis solares.** Portal EnerSolar Brasil. Disponível em: <http://www.enersolarbrasil.com.br/preco-ao-nivel-da-energia-fossil-e-aquecimento-global-fazem-disparar-a-procura-da-industria-de-paineis-solares/>. Acessado em: 09 de nov. 2015.

RODRIGUES, William C. **Metodologia Científica.** FAETEC/IST, Paracambi, Rio de Janeiro, 2007.

RONEY, J. M. **World Solar Power Topped 100,000 megawatts in 2012.** Compilado pelo Earth Policy Institute (EPI). Disponível em: [http://www.earth-policy.org/indicators/C47/solar\\_power\\_2013](http://www.earth-policy.org/indicators/C47/solar_power_2013). Acessado em: 30 de nov. 2015.

SANTOS, D. **Cadeia de suprimentos sustentável e orientada a serviços (CSS<sup>2</sup>) como instrumento operacional de competitividade e sustentabilidade ambiental para a indústria: Modelo estrutural e operacional.** 2011. 184 f. Tese (Mestrado em Tecnologia) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo. São Paulo. 2011.

SERODIO, Leonardo M. **O Estado da Arte das Técnicas de Produção de Silício Cristalino para PV.** Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

SLACK, Nigel. **Vantagem competitiva em Manufatura.** São Paulo. Editora Atlas, 1993.

SUPPLY CHAIN COUNCIL – **Conceituação da cadeia de Suprimentos.** Disponível em: <http://www.apics.org/sites/apics-supply-chain-council>. Acessado em: 30 de nov. 2015.

VARELLA, Fabiana K. O. M. CAVALEIRO, Carla K. N. SILVA, Ennio P. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Incentivos Regulatórios.** *Revista Brasileira de Energia*, Vol. 14, No. 1, 1o Sem. 2008, pp. 9-22. 2008.

VILELA JUNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. **Modelos e ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações.** Brasil, São Paulo – SP. Editora Senac, 2006.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral commodity summaries.* United States government printing office, Washington, 2014. Disponível em: [minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf). Acessado em: 21 de mai. 2014.

## GLOSSÁRIO

**Anodizado:** Metal submetido à ação eletrolítica, fazendo-o ânodo de uma pilha.

**Desgaseificação:** é o processo físico da lenta liberação de gases quando presos, de materiais congelados, absorventes ou adsorventes.

**Triclorossilano:** é o composto químico de fórmula  $\text{SiHCl}_3$ . Em altas temperaturas decompõem-se produzindo silício.