

Série Rochas e Minerais Industriais

Silício Grau Solar - Uma Revisão das Tecnologias de Produção

João Alves Sampaio (*in memoriam*)

Roberto Salgado Amado

Péricles Sávio Garcia Marques

Lívia Gonçalves Leida Soares



SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

**Silício Grau Solar – Uma Revisão das Tecnologias de
Produção**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Jair Messias Bolsonaro

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

Marcos Cesar Pontes

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Julio Francisco Semeghini Neto

Secretário Executivo

Lorenzo Jorge Eduardo Cuadros Justo Junior

Subsecretário de Unidades Vinculadas

Cesar Augusto Rodrigues do Carmo

Coordenador-Geral das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Gustavo Silva Menezes

Coordenador de Administração - COADM

Robson de Araújo D'Ávila

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador do Núcleo Regional do Espírito Santo - CONES

José Antônio Pires de Mello

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

ISSN 0103-7382

ISBN – 978-85-8261-101-2

SRMI - 26

Silício Grau Solar – Uma Revisão das Tecnologias de Produção

João Alves Sampaio (*In Memoriam*)

Engenheiro de Minas – UFPE, D.Sc. em Engenharia
Metalúrgica e de Materiais – COPPE/UFRJ. Pesquisador do
CETEM/MCTIC

Roberto Salgado Amado

Químico – UFRJ, M.Sc. em Engenharia Metalúrgica e de
Materiais, D.Sc. em Química – IQ/UFRJ. Professor Adjunto
do IQ/UFRJ

Péricles Sávio Garcia Marques

Engenheiro Metalurgista - UFRJ

Lívia Gonçalves Leida Soares

Química com atribuição tecnológica - UFRJ, M.Sc. em
Química - IQ/UFRJ

CETEM/MCTIC

2019

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

Silvia Cristina Alves França

Editora

Luiz Carlos Bertolino

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Adão Benvindo da Luz (CETEM), Francisco Wilson Hollanda Vidal (CETEM), Jurgen Schnellrath (CETEM), Artur Pinto Chaves (EPUSP), Luis Lopes (Universidade de Évora), Carlos Adolpho Magalhães Baltar (UFPE), Marsis Cabral Junior (IPT), José Yvan P. Leite (IFRN) e Renato Ciminelli (consultor).

A Série Rochas e Minerais Industriais publica trabalhos na área minerometalúrgica, com ênfase na aplicação de minerais industriais e de rochas ornamentais. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes de projetos desenvolvidos no CETEM e em instituições de PD&I parceiras.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Editoração Eletrônica

Ana Maria Silva Vieira de Sá

CRB7 3982

Catálogo na Fonte

Sampaio, João Alves (*in memoriam*)

Silício Grau Solar – Uma Revisão das Tecnologias de Produção / João Alves Sampaio (*in memoriam*) [et al.]. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019.

101p. il. (Série Rochas e Minerais Industriais, 26)

1. Fotovoltaica. 2. Silício solar. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Sampaio, João Alves (*in memoriam*). III. Amado, Roberto Salgado. IV. Marques, Péricles Sávio Garcia. V. Soares, Livia Gonçalves Leida. VI. Série.

CDD – 546.683

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO	13
2 ENERGIA SOLAR	15
3 PAINÉS SOLARES FOTOVOLTAICOS	20
3.1 Efeito Fotovoltaico	20
3.2 Célula Fotovoltaica	25
3.3 Células de Silício Monocristalino	27
3.4 Células de Silício Policristalino	28
3.5 Células de Silício Amorfo	29
3.6 Eficiência	29
4 MATÉRIA-PRIMA BÁSICA PARA OBTENÇÃO DE SILÍCIO SOLAR	35
4.1 Caracterização Tecnológica da Matéria-prima	37
5 PRODUÇÃO DE SILÍCIO GRAU SOLAR - SIGS	41
6 PROCESSOS DE PURIFICAÇÃO DO SILÍCIO	46
6.1 Processo Siemens	46
6.2 Processo Union Carbide	50
6.3 Processo Ethyl	55
6.4 Processo Elkem	57
7 SILÍCIO MONOCRISTALINO	59
7.1 Processo Czochralski	59
7.2 Fusão Zonal Flutuante (Float Zone)	63

8 SILÍCIO POLICRISTALINO	67
8.1 Processo Solidificação Direcional Controlada	67
9 OBTENÇÃO DE SILÍCIO EM FILMES (FITAS)	70
9.1 Processo CDS (<i>Crystallization on Dipped Substrate</i>)	70
9.2 Processo RGS (<i>Ribbon Growth on Substate</i>)	71
9.3 Processo SSP (<i>Silicon Sheet from Powder</i>)	72
9.4 Processo EFG (<i>Edge Defined Film Feed Growth</i>)	73
9.5 Processo SR (<i>String Ribbon</i>)	74
10 SILÍCIO AMORFO	76
11 PESQUISAS DA ÁREA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL	78
12 COMENTÁRIOS ADICIONAIS	84
13 GLOSSÁRIO	86
14 AGRADECIMENTOS	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	98

RESUMO

O interesse pelo crescimento econômico associado ao desenvolvimento sustentável, torna-se mais intenso a cada ano, motivando melhorias na qualidade de vida, que resultam numa grande demanda por energia. Neste sentido, o uso da energia solar, como fonte alternativa, avança de forma progressiva, estimulado pelas características favoráveis de uma energia abundante e inesgotável, além de limpa, entre todas as formas de energia renovável do nosso Planeta.

Desde que há vida sobre a Terra, a energia solar encontra-se à disposição de todos os seres vivos, inclusive do homem. Entretanto, a sua utilização, em harmonia com as exigências da sociedade moderna, sempre esteve muito aquém do seu potencial, mesmo sendo uma fonte limpa e inesgotável de energia. Pode-se afirmar que o aproveitamento total da radiação incidente sobre a Terra, exige o domínio de tecnologias avançadas, o que limita o uso dessa energia, em especial, sua competitividade com as fontes convencionais que exigem tecnologias bem mais simples.

A energia do Sol que atinge a Terra é cerca de $1,8 \times 10^{11}$ MWh, isto é, muitas vezes maior que a taxa anual do consumo de energia elétrica em todo o Planeta. Não obstante, estima-se que cerca de 30% da população mundial, cerca de dois bilhões de pessoas, ainda vivem em condições dependentes do carvão ou biomassa para cozinhar alimentos, usam velas e pilhas para conversão em energia luminosa, querosene e diesel para geração de eletricidade. No Brasil, quase 40 milhões de habitantes ainda vivem sem o uso da energia elétrica. Isso equivale à soma das populações da Argentina e Chile.

O mercado de células fotovoltaicas (FV) cresce numa taxa anual superior a 40%. Em 2018 a potência solar instalada global foi de 505 GW; no mesmo ano o consumo global de

energia foi da ordem de 145.000 TWh, dos quais 0,23% foram atendidos pela oferta de energia fotovoltaica. Em cenário apresentado pela Agência Internacional de Energia - IEA, a expectativa de consumo global para 2050 é de 220.000 TWh, com a energia solar respondendo por cerca de 11% dessa demanda. Assim, haverá a necessidade de geração de cerca de 70.000 TWh de energia limpa para estabilizar as emissões de CO₂, ainda na metade deste século. Por oportuno, a energia FV irá desempenhar um papel significativo na demanda futura em todo o mundo, mesmo com avaliações menos otimistas.

A energia solar é aproveitada tanto pela conversão direta em energia elétrica como na alimentação de usinas termossolares, tornando-a uma importante fonte de energia alternativa. São conhecidas grandes usinas termossolares com eficiência de 50%, sem os transtornos da poluição radioativa, de instalações de processamento e enriquecimento, e, inclusive, de destinação do lixo atômico, fatores inerentes ao sistema nuclear. Ainda, as células fotovoltaicas, também chamadas de solares, permitem que a luz do sol (radiação eletromagnética) seja captada e transformada em energia elétrica, sem agressões ao meio ambiente.

A previsão de crescimento da demanda pelo silício de alta pureza, especialmente para a produção de componentes e circuitos eletrônicos e células fotovoltaicas, torna a cadeia produtiva do silício estratégica para o Brasil, sendo considerada no Plano Estratégico de Ciência, Tecnologia e Inovação 2018-2022, do Governo Federal. Soma-se a esse fato a busca por matrizes energéticas mais limpas e renováveis, com menor emissão de CO₂, o que evidencia a necessidade de conhecimento e de avanços tecnológicos na cadeia produtiva desse bem mineral.

Assim, este trabalho apresenta uma síntese geral das principais tecnologias para produção de silício grau solar, nas suas formas usuais, monocristalino, policristalino ou amorfo, além de expor como são e funcionam as células fotovoltaicas.

Palavras-chave

Fotovoltaica, silício solar, energia fotovoltaica, efeito fotovoltaico, energia solar, processo Czochralski.

ABSTRACT

Interest in economic growth associated to sustainable development becomes more intense each year. It contributes to the improvements in quality of life, and resulting in a huge demand of energy. In this sense, the use of solar energy as alternative source advances progressively by their favorable characteristics of abundant energy, i.e, immeasurable, and clean among all forms of renewable energy on the Earth.

Since there is life on Earth, solar energy is available to all living beings, including man. However, to use it in harmony with the demands of modern society, It has always been far away of its potential, while being a source of clean and infinite of energy. It can be supposed that the total utilization of the incident radiation on the Earth requires advanced technologies, which limits the use of energy, in special, its competitiveness with conventional sources that require conventional technologies.

The energy that comes from the sun reaching the earth is about 1.8×10^{11} MWh that is often greater than the annual electricity demand in the Earth. Nevertheless, it is estimated that about 30% of the world, around two billion people, still depend on coal or biomass for cooking food, candles and batteries have been used for converting light energy, kerosene and diesel generation electricity. In Brazil, nearly 40 million people still live without the use of electricity, it means populations of Argentina and Chile.

The photovoltaic cell market grows at an annual rate above 40%. In the year 2018, solar photovoltaic (PV) technology has reached a significant milestone of 505 GW of total installed solar power capacity. If the same year the energy global consumption reached 145,000 TWh, with 0.23% supplied by photovoltaic energy. In a 2050 scenario presented by International Energy Agency (IEA) the energy consumption

forecast will be 220,000 TWh, where 11% of this demand will be supplied by photovoltaic sources. The world will need 70,000 TWh of clean energy to stabilize CO₂ emissions, even in the middle of this century. At the appropriate time, the PV energy will play a significant role in future demand, in spite of few optimistic estimates.

Solar energy is used by both the direct conversion into electrical energy, or as feed in thermo power plants, bringing it as an important source of alternative clean energy. Large photovoltaic power plants are operating with 50% efficiency, without the need of buildings for processing and enrichment or nuclear fuels, radioactive wastes production and some other inherent characteristics of nuclear power plants.

The forecast growth in the demand for high purity silicon, especially for the production of components and electronic circuits and photovoltaic cells, makes the silicon productive chain strategic for Brazil, being considered in the Strategic Plan of Science, Technology and Innovation 2018-2022, presented by Federal Government. In addition, the search for cleaner and renewable energy sources, with a lower CO₂ emission, is an evidence of the need for knowledge and technological advances in the production chain of this mineral.

This paper presents a general overview of the major technologies for producing solar grade silicon in its usual forms, monocrystalline, polycrystalline or amorphous, and it shows how the photovoltaic cells works.

Keywords

Photovoltaic, solar silicon, photovoltaic, photovoltaic effect, solar energy, Czochralski process.

1 | INTRODUÇÃO

O Sol é uma fonte inesgotável de energia e seu aproveitamento tornou-se importante à produção de energia elétrica, por ser uma energia com característica não agressiva ao meio ambiente. Todavia, o seu aproveitamento em escala comercial depende de tecnologias capazes de superar desafios científicos e tecnológicos, em especial, aqueles relativos aos custos elevados associados ao processo de obtenção da energia elétrica, por meio de células fotovoltaicas.

O francês Alexandre-Edmond Becquerel, em 1839, deu o primeiro passo, com a descoberta do efeito fotovoltaico, ao observar que placas metálicas de platina ou prata, quando mergulhadas em um eletrólito e expostas à luz produziam uma tensão que resulta numa corrente elétrica (RAZYKOV, 2011). Entretanto, somente em 1954, a Bell Labs conseguiu fabricar uma célula fotovoltaica com eficiência de 6% e capaz de produzir 5W. Após meio século deste evento, chegou-se a produzir uma célula com eficiência da ordem de 20%.

Materiais como telureto de cádmio, di-seleneto de cobre-índio e outras são matérias-primas usadas na fabricação de células solares, entretanto a maioria delas é produzida com silício grau solar (SiGS). Por ser um semicondutor e com uma elevada abundância na crosta terrestre, na forma de quartzo (SiO_2) e principalmente alumino-silicatos, o silício tornou-se o sólido cristalino ou amorfo de preferência para a fabricação de células fotovoltaicas.

A principal matéria-prima para obtenção do SiGS ainda é o quartzo, que, por meio de uma reação carbotérmica produz o silício grau metalúrgico (SiGM). Este produto ainda é inapropriado à produção de células fotovoltaicas devido ao teor

elevado de impurezas. Todavia, há vários processos empregados para purificar o silício grau metalúrgico (SiGM) e, finalmente, obter o silício grau solar (SiGS), com pureza elevada.

Há, no mercado, quatro tipos de silício cujas diferenças residem na presença e nível de alguns tipos de impurezas; o SiGM é o menos puro, seguido do químico, do solar e o de grau eletrônico (SiGE), com maior nível de pureza.

Até o fim da década de 1990, o SiGS era obtido como subproduto do SiGE contido em sucata, entretanto, com o crescimento contínuo do consumo de SiGS, a produção de SiGE não atendeu a demanda do solar. Portanto, tornou-se urgente desenvolver tecnologias capazes de expandir a produção do SiGS, isto é, produção em larga escala e com baixo custo. Várias são as razões que explicam o crescimento continuado da demanda de SiGS, dentre outras destacam-se (IPT, 2011; CARVALHO et al., 2014):

- a inevitável substituição de fontes de energia advinda de combustíveis fósseis por energias limpas e renováveis;
- as taxas de crescimento da energia fotovoltaica foram da ordem de 40% por ano na última década, chegando a valores próximos de 50% nos últimos três anos;
- há uma redução, também continuada, no custo da energia fotovoltaica, ano a ano, e previsão de redução dos custos em níveis competitivos com as fontes convencionais, no período de 2020-2030.

No Brasil, as pesquisas sobre energia fotovoltaica são realizadas praticamente nas universidades, pouco são os trabalhos desenvolvidos com empresas ou por estas.

2 | ENERGIA SOLAR

Energia solar é aquela proveniente do sol, seja essa luminosa, térmica ou outra. É considerada a fonte responsável pela origem, praticamente, de todas as fontes de energia, dentre essas, hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis, energia das marés, que são formas indiretas da energia solar. Esta pode ser captada e transformada em energia térmica para aquecimento de fluídos, ou produção de energia elétrica, dentre outras. A conversão direta da radiação solar em energia elétrica dá-se com o auxílio de painéis solares, para posterior utilização.

O Sol é um grande reator à fusão nuclear e irradia a terra todos os dias com um potencial energético extremamente elevado. Estima-se que, a energia solar incidente sobre a Terra, durante uma hora, corresponda ao consumo anual de energia elétrica de todo o Planeta. Cerca de 30% dessa radiação é refletida de volta ao espaço, enquanto o restante é absorvido pelas nuvens, oceanos e as massas da Terra.

Diversas são as vantagens da energia elétrica obtida com base na energia solar fotovoltaica (www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/), dentre outras, destacam-se:

- é uma energia limpa, pois ao se captar, gerar e transformar não agride o meio-ambiente, inclusive é uma energia que provém de uma fonte inesgotável, o que lhe assegura a estabilidade econômica;
- o preço do kWh fotovoltaico caiu, substancialmente, por política da China que, provavelmente, tem subsídios na sua estrutura de produção;

- o kWh fotovoltaico tem preço reduzido por práticas de tarifas prêmio, em alguns países;
- é uma excelente alternativa para uso nas localidades remotas, em especial nos países tropicais e durante o todo o ano;
- as células fotovoltaicas são produzidas em módulos que facilitam, tanto a manutenção, como a expansão do sistema;
- há produção de painéis solares mais baratos com potência e eficiência mais elevadas, viabilizando economicamente a energia solar fotovoltaica;
- possui instalações resistentes aos eventos naturais como descargas atmosféricas, ventos e outros;
- possui fácil instalação e manutenção, pois, não há partes móveis, vida útil prolongada e pode ser utilizada em todo território nacional por ser um país tropical. No Brasil existem instalações em funcionamento há mais de 25 anos.

Além disso, a energia solar, em decorrência da sua portabilidade, possui um elevado efeito multiplicativo e pode ser usada, além das residências, em estações de rádio, televisão, dessalinadores de água, sinalização marítima, naves espaciais, abastecimentos de áreas militares ou destinadas à pesquisa científica, dentre outras.

As oportunidades de estudo associadas a esta matriz energética são, por demais, diversificadas, como algumas relacionadas a seguir.

A energia solar tornou-se aos poucos uma alternativa viável para uso doméstico, entretanto, faltam avanços tecnológicos e científicos para torná-la competitiva em relação à energia advinda de hidrelétricas, principalmente, no Brasil, onde o custo da energia elétrica ainda é baixo. Antes dos avanços tecnológicos, precisa-se esquecer o mito tendencioso de que a energia fotovoltaica é de uso específico para as instalações domésticas.

Há muito que se pesquisar na área de armazenamento da energia elétrica advinda da forma fotovoltaica para atingir os níveis correspondentes às fontes convencionais: combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), energia hidrelétrica (água) e biomassa (bagaço da cana ou da laranja, dentre outros). Assim, tornam-se possíveis as soluções para as limitações associadas ao consumo noturno e outros. O armazenamento de energia elétrica produzida, durante o dia, em acumuladores, é de baixa eficiência. Usam-se quantidades elevadas desses dispositivos que, além de uma vida útil limitada, estão associados ao condicionante ambiental. Pode-se afirmar que a exploração econômica de uma fonte de energia requer duas premissas básicas: o sistema deve ser eficiente e ter um fornecimento sem intermitência.

A eficiência das células fotovoltaicas, ainda baixa, carece de estudos avançados para se produzir células fotovoltaicas de eficiência mais elevada e não apenas os valores obtidos no caso das melhores placas solares comercializadas no mundo, com 16% de eficiência (ZANESCO et al., 2018). Com isto, é possível o aproveitamento fotovoltaico da energia solar com menor área instalada, inclusive o aproveitamento da radiação solar em locais cujas situações atmosféricas não são ideais

(chuvas, nuvens, nebulosidade) e latitudes desfavoráveis, isto é, médias e altas (Finlândia, Islândia, Nova Zelândia e Sul da Argentina e Chile).

Num painel solar, além do consumo significativo de energia incluído no seu processo de fabricação, deve-se, também, considerar o nível de pureza exigido para o SiGS. Esta área é objeto de estudo intenso com o propósito de obter um produto final, painel solar, com baixo custo de produção, tornando-o mais competitivo. Os resultados dos estudos de pesquisa nesta área já são evidenciados pelas reduções dos preços finais dos painéis solares a cada ano (MME, 2017).

A energia oriunda do Sol pode ser aproveitada sob a forma térmica ou elétrica. No primeiro caso, considera-se a quantidade de energia que um corpo pode absorver sob forma de calor, com base na radiação solar incidente no mesmo. Desta forma, se tem a energia absorvida, principalmente, por coletores solares para aquecimento de água e geração de vapor, seguido de conversão em energia elétrica por meio das usinas termossolares. De mais a mais, processo similar de aquecimento da água, por energia solar, é bastante empregado no setor residencial, ou seja, utilização da água aquecida nas atividades domésticas, uso já bem difundido no Brasil, em decorrência da sua praticidade e baixo custo.

A energia do Sol pode ser aproveitada para produção de energia elétrica. A conversão baseia-se em dois efeitos: o termoelétrico e o fotovoltaico.

O efeito termoelétrico se caracteriza pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, quando tal junção está a uma temperatura mais elevada do que as outras extremidades do fio. É uma forma de geração com

um rendimento baixo, usado, basicamente, para construção de medidores de temperatura. No entanto, existem outras aplicações, como o robô que foi lançado mais recentemente para Marte, que usa esta forma de produção de energia, considerada melhor que a fotovoltaica para esta aplicação.

A conversão por meio do efeito fotovoltaico consiste na utilização de painéis fotovoltaicos, nos quais a radiação solar é diretamente convertida em energia elétrica, embora o efeito fotovoltaico possa ocorrer em qualquer placa metálica exposta à radiação eletromagnética (luz solar). Os autores descrevem esta forma de conversão, com suas particularidades, ao longo deste trabalho.

3 | PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS

3.1 | Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico, descoberto por Alexandre Edmond Becquerel, em 1939, é usado em células solares e permite a conversão da luz solar em energia elétrica (RAZYKOV, 2011). A luz solar, ao incidir sobre uma célula fotovoltaica (FV), pode ser refletida, absorvida ou passar completamente pelo meio, entretanto, somente parte da luz absorvida pela célula pode gerar a energia elétrica. Ao incidir sobre uma célula FV na forma de radiação, a energia dos fótons absorvidos é transferida aos seus átomos e elétrons. Ao adquirir energia, estes elétrons desprendem-se dos átomos do material da placa e formam um fluxo, isto é, a corrente elétrica (GHENSEV, 2006). Este efeito ocorre em materiais semicondutores, que se caracterizam pela existência de bandas de energia, uma com elétrons (banda de valência), e outra sem elétrons, totalmente vazia, chamada banda de condução.

Por definição, os semicondutores são materiais sólidos que possuem condutividade elétrica entre os condutores e isolantes. Esses materiais comportam-se como isolantes a baixas temperaturas e como condutores a temperaturas elevadas. O silício, um bom exemplo de semicondutor, é muito utilizado na fabricação de células fotovoltaicas. O átomo de silício possui quatro elétrons na última camada de valência, e, quando puro, não possui elétrons livres, portanto não se trata de um bom condutor elétrico. Para alterar essa configuração acrescentam-se outros elementos à rede cristalina do silício

puro; esse processo é chamado dopagem eletrônica e os tipos de elementos adicionados dependem, dentre outros fatores, da natureza do semicondutor.

No presente caso, considera-se a dopagem feita por meio de fósforo e boro. Com adição de fósforo, que possui cinco elétrons na última camada de valência, altera-se a estrutura eletrônica do silício, que passa a ter um elétron livre, ou silício portador de cargas negativas (silício tipo **n**). Este elétron em excesso não poderá emparelhar-se na rede, ficando fracamente ligado ao núcleo e com uma pequena quantidade de energia, por isso esse passa da banda de valência à banda de condução.

A dopagem também pode ser obtida por adição de elementos com um menor número de elétrons, como por exemplo o boro, que tem três elétrons. Dessa forma, obtém-se um silício com falta de elétrons ou receptor de elétrons, que é o silício tipo **p**. A ilustração da Figura 1 exemplifica um semicondutor com dopagens tipo **p** e **n**. O efeito de dopagem, que é a adição de dopantes ao silício puro, só resulta no efeito fotovoltaico quando a introdução desses dopantes (fósforo e boro) ocorre de forma bem definida e controlada. No caso do silício impuro, as impurezas contidas provocam um desarranjo “eletroatômico” e, dificilmente, haverá corrente elétrica entre as bandas, isto é, não há o real efeito fotovoltaico.

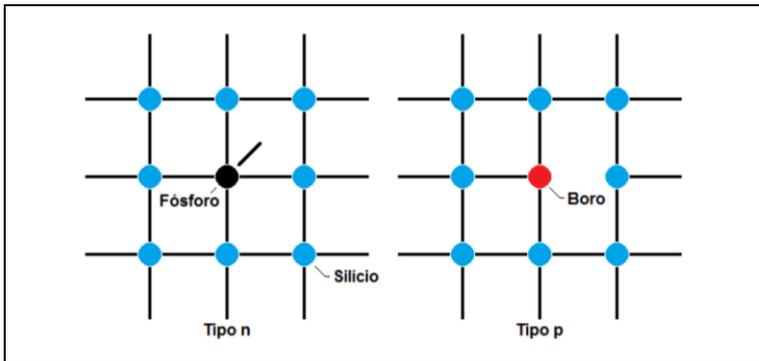


Figura 1. Semicondutores dopados tipo n (à esquerda) e tipo p (à direita).

As células fotovoltaicas geralmente consistem de duas camadas justapostas de semicondutores, cada camada com seus elementos dopantes. A estrutura composta por duas regiões produzem uma interface denominada junção **pn**, onde se estabelece um campo elétrico interno. Esse campo advém da passagem dos elétrons livres do semicondutor do tipo **n** para o do tipo **p**, que durante a migração são capturados nos espaços vazios existentes na estrutura, buracos provocando um acúmulo de elétrons e tornando-a eletricamente negativa. Desta forma, a redução de elétrons na banda **n** torna-a eletricamente positiva, desse modo ocorre a formação de um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do semicondutor do tipo **n** para o **p** (MEIRELLES, 2002). Esse movimento de elétrons atinge um estado de equilíbrio, isto é, o campo elétrico que impede a passagem de elétrons remanescentes na banda **n**. Nesta configuração forma-se uma barreira, chamada de zona de depleção, que interrompe a difusão dos elétrons. Este evento ocorre porque

os elétrons do tipo **n** preenchem os vazios do material tipo **p** nas proximidades da junção entre as camadas de tipos **p** e **n** (Figura 2).

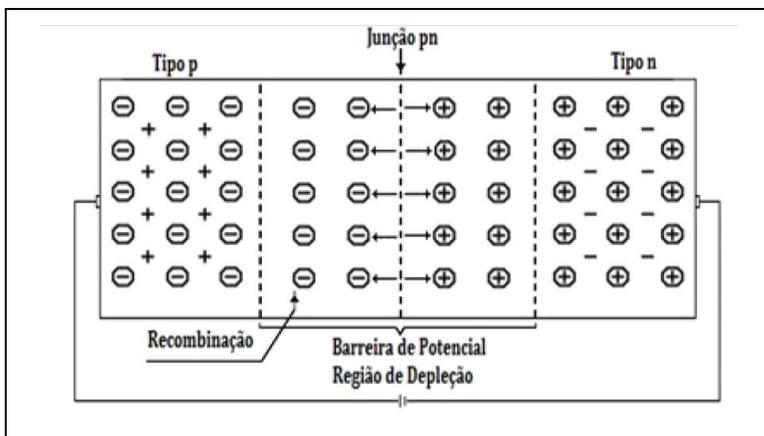


Figura 2. Diagrama ilustrativo da zona de depleção numa célula fotovoltaica.

Nesta situação, para promover o fluxo de elétrons, a célula precisa ser exposta a fótons com energia maior do que a necessária para o elétron transpor o *gap* de energia do semiconductor e deslocar-se de uma banda para outra. Por conseguinte, os elétrons do semiconductor do tipo **n** ganham energia, e o deslocamento dos mesmos dar-se-á na direção do semiconductor tipo **p**.

Ao atingir o estado de equilíbrio ou depleção na junção **pn**, procede-se a instalação de coletor de cargas elétricas para drenagem de cargas majoritárias entre os materiais tipo **p** e **n**. O campo elétrico criado entre os diferentes materiais estabelece uma diferença de potencial e uma corrente elétrica, na forma contínua, e cada tipo de material tem uma diferença

de potencial específica, para a qual o silício proporciona um valor em torno de 0,5 V (RODRIGUES, 2008). O deslocamento de cargas provoca uma diferença de potencial chamada de efeito fotovoltaico, que é o evento responsável pelo funcionamento das células fotovoltaicas.

Todo esse movimento de elétrons no interior do semicondutor se altera quando há impurezas indesejadas associadas ao mesmo. Por estas e outras razões, o quartzo utilizado na obtenção do silício solar e o redutor devem conter o mínimo possível de impurezas. Ao utilizar um quartzo natural de pureza elevada, facilitam-se as etapas seguintes de purificação do silício grau metalúrgico, nos processos de obtenção do silício grau solar e, conseqüentemente, uma redução no custo final de fabricação da célula fotovoltaica.

Ao conectar cada extremidade da célula a um fio e depois a um dispositivo (lâmpada, motor elétrico, etc.), haverá um fluxo ordenado de elétrons (corrente) enquanto houver luz incidindo sobre a célula. Desse modo, uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico, enquanto houver incidência de luz solar sobre a mesma, conforme esquematizado na Figura 3. A corrente resultante do efeito fotovoltaico é contínua, portanto, no caso de médias e grandes instalações, há necessidade do uso de inversores, para transformá-la em corrente alternada. O armazenamento de energia é a etapa seguinte à sua geração.

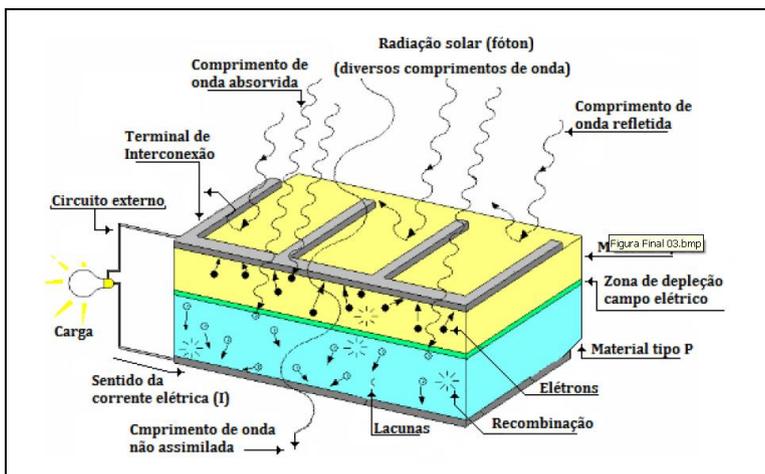


Figura 3. Diagrama representativo da junção **pn** em uma célula fotovoltaica (Ghensev, 2006).

3.2 | Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica consiste na unidade básica usada na conversão de energia solar (radiação) em energia elétrica, isto é, o menor elemento do sistema fotovoltaico, que produz uma corrente típica da ordem de 3,0 A e tensão em torno de 0,5 V. O tamanho padrão das células fotovoltaicas é: 10x10 cm; 12,5x12,5 cm ou 15x15 cm. Já os painéis solares são constituídos de várias células solares montadas em forma retangular, com tamanho em torno de 0,6 a 1,20 m.

A eficiência desses painéis, em geral, é da ordem de 15 a 16%, porém este valor ainda é considerado baixo para o processo de conversão de energia solar em energia elétrica (MOEHLECKE et al., 2017). No caso de células de silício policristalino ou monocristalino, a eficiência de conversão da energia solar para

elétrica varia de 15 a 22%, no entanto as de silício amorfo (filme fino) têm eficiência baixa, por volta de 5% (Sapa Solar – Celulas fotovoltaicas, 2017).

As células solares estão comercialmente disponíveis em módulos fotovoltaicos ou painéis, cujo arranjo pode ser feito conectando-as em série, paralelo ou misto (série e paralelo) com o propósito de maximizar a tensão ou a corrente. Para se ter ideia, com um painel constituído de 36 células, ligadas em série, pode-se obter uma tensão com valor entre 15 a 20 V.

As células fotovoltaicas comerciais são fabricadas à base de silício monocristalino, policristalino ou amorfo. Estes são cobertos por uma camada transparente de um material que deve ser resistente à radiação solar e assegurar a proteção superficial da célula contra os efeitos corrosivos; além disso, há também nas células (Figura 4):

- uma camada antirreflexiva para evitar a reflexão de raios e, conseqüentemente, perda de incidência da radiação solar;
- contatos soldados nas malhas que garante o direcionamento do fluxo de elétrons ao equipamento ou acumulador.

Na Figura 4 consta um diagrama ilustrativo de uma célula fotovoltaica com uma descrição do seu conteúdo.

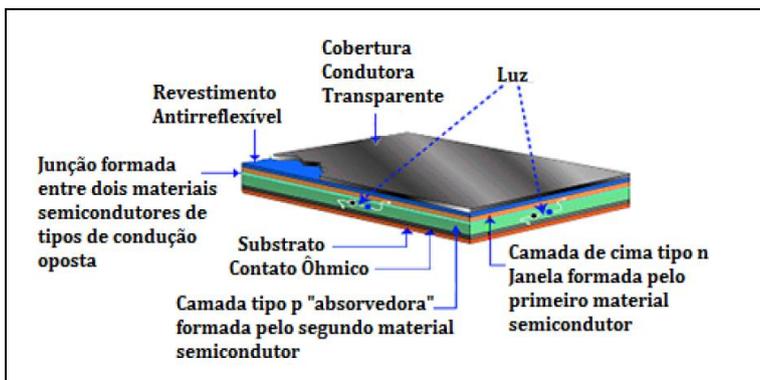


Figura 4. Diagrama ilustrativo do formato de uma célula fotovoltaica (MAGALDI, 2009).

3.3 | Células de Silício Monocristalino

No estado monocristalino, o silício possui uma estrutura homogênea em todo o sólido, em especial, a orientação cristalográfica e suas propriedades eletrônicas. A produção do silício monocristalino representa cerca de 50% da produção do silício destinado a indústria fotovoltaica. O silício monocristalino é obtido, na maioria das vezes, pelo processo Czochralski, cujo produto final é cortado em lâminas de 0,3 mm de espessura aproximadamente, com as quais se produzem as células fotovoltaicas. A dopagem por meio de fusão controlada torna-se mais fácil, devido à estrutura cristalina homogênea do semicondutor. Essa é uma das razões, pela qual a eficiência destas células situa-se entre 15 e 25% (BRAGA, 2008; JANNUZZI, 2009).

3.4 | Células de Silício Policristalino

Na produção do silício multicristalino, procura-se obter o maior tamanho possível dos seus cristais, com uma orientação cristalográfica variada. A pureza deste silício pode atingir o índice de 99,999%, fornecido em forma de barras com 1,5 a 2,5 m de comprimento. O silício policristalino, ultrapuro, é muito aplicado na indústria de semicondutores. Na prática, os grãos são visíveis nas células de silício policristalino e conhecidos como “flocos metálicos”. Estes são produzidos com base em blocos de silício resultantes da fusão de silício puro em moldes especiais. É um processo mais barato, comparado àquele empregado nas células monocristalinas. Nesses moldes, o silício solidifica-se, por resfriamento lento, e resulta numa estrutura policristalina. É suscetível à formação de defeitos durante a solidificação que comprometem seu desempenho, tornando-o ligeiramente menor do que nas células monocristalinas. (GHENSEV, 2006; BRAGA, 2008).

3.5 | Células de Silício Amorfo

Estas células são confeccionadas com silício que contém elevado nível de desordem na sua estrutura atômica. Na confecção das mesmas, utilizam-se filmes muito finos (cerca de 1,0 mm) que podem ser depositados sobre substratos, como aço ou vidro. Nesse processo não existe a etapa de corte que facilita a confecção da célula e, assim, são obtidas na forma de fitas com baixo custo de produção. Possui baixa eficiência de conversão, razão pela qual são aplicadas aos dispositivos que exigem baixa potência (relógios, calculadoras, etc.) ou quando existe grande área disponível (fachadas de edifícios) (CRESESB, 2006; GHENSEV, 2006).

3.6 | Eficência

A eficiência termodinâmica das células fotovoltaicas é de grande interesse, em razão deste parâmetro relacionar-se à conversão de energia. Esta grandeza depende da radiação solar: o Sol não emite todas as suas radiações com fótons de mesma energia, ou seja, igual àquela associada ao *gap* do semicondutor utilizado na fabricação das células FV. Desse modo, a eficiência das células torna-se, em parte, dependente da radiação incidente com valor energético igual ou superior à do *gap* do semicondutor.

De toda a radiação solar incidente na superfície da célula fotovoltaica, apenas as com comprimentos de onda na faixa de luz entre o ultravioleta e parte do infravermelho (0,25 a 110 nm, no caso do silício) têm energia suficiente para liberar elétrons da estrutura atômica, criando pares elétron-lacuna e produzindo corrente elétrica. Em outras palavras, é necessário que os fótons da radiação solar possuam energias iguais ou

superiores ao *gap* do material semiconductor. Vários são os fatores ou eventos que promovem perdas na transformação da energia contida na radiação solar em energia elétrica.

A recombinação dos pares, elétrons-lacunas, consome 15% da radiação incidente, ademais, 5 a 8% da energia é consumida na estrutura interna do material, seja pelas microfissuras, pelas impurezas do material ou ainda pelos contatos de interconexão.

Ocorre um desperdício de 25% de energia para incidência de fótons com valor abaixo do *gap*. Para valores de energia acima do *gap*, 30% da radiação é transformada em calor (GHENSEV, 2006). No primeiro caso, aplica-se um semiconductor com alto índice de absorção, assim recomendam-se o uso de filmes finos com espessura da ordem de 1,0 μm , que absorvem cerca de 90% da radiação. No caso do silício policristalino, com espessura entre 50 e 150 μm ou menos, a absorção é mais efetiva.

Uma parcela da radiação incidente, cerca de 3 a 6%, é refletida pela superfície da célula, cujas perdas são minimizadas por meio de técnicas de texturização que, sem pormenores, consiste na abertura de ranhuras na superfície da célula. Várias são as formas de texturização da superfície da célula com destaques para aquelas que formam cavidades piramidais, piramidais invertidas (*hillocks*) e aquelas em forma de colméias, segundo as ilustrações da Figura 5.

Para produzir essas texturizações são usados agentes químicos como hidróxidos de sódio (NaOH) e de potássio (KOH). As células texturizadas promovem um aumento perto de 2% na absorção de fótons por dia, correspondendo a um desempenho de 25 Wh/m^2 (PROENÇA, 2007).

No diagrama da Figura 6 estão relacionados os principais índices percentuais de energia incidente e a energia assimilada pela célula fotovoltaica.

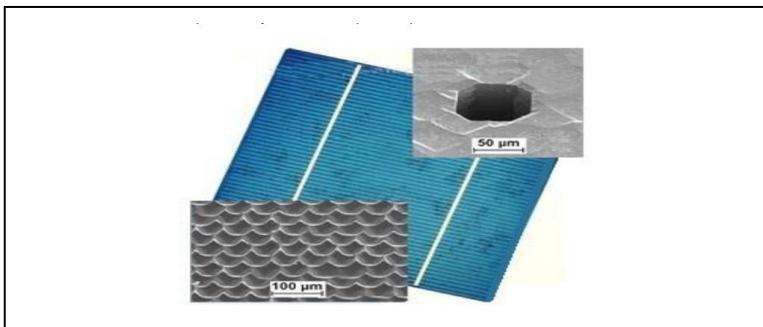


Figura 5. Exemplo ilustrativo de texturização de uma célula fotovoltaica.

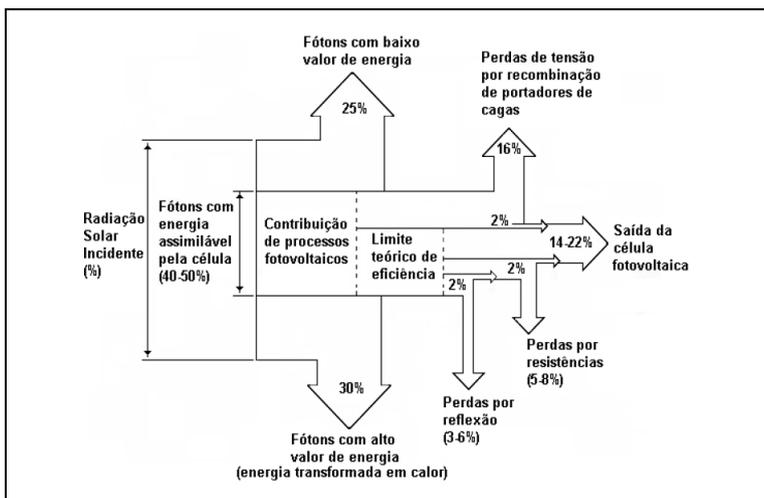


Figura 6. Ilustração dos índices percentuais de energia incidente e assimilada pela célula fotovoltaica (GHENSEV, 2006).

Ainda se observa que a incidência de fótons com valores elevados de energia, acima do *gap*, provoca a transformação da radiação solar em calor; desse modo, aumenta a temperatura da célula e, mais ainda, as perdas. Como resultado final desse processo surge uma redução significativa na eficiência da célula.

A análise dos resultados, expressos na Figura 7, indica que a tensão para valores próximos de 0°C, situa-se em torno de 25 V. No entanto, para temperaturas elevadas (próximas a 100°C), obtém-se os menores valores da tensão, em torno de 15 V, com baixos valores da corrente. Por essas e outras razões, pode-se afirmar que, de toda a radiação solar incidente sobre a superfície da célula, apenas uma parcela (14 a 22%) é convertida em energia elétrica. Para uma mesma tensão (V), quando aumenta-se a corrente, aumenta-se a potência/m² (GHENSEV, 2006).

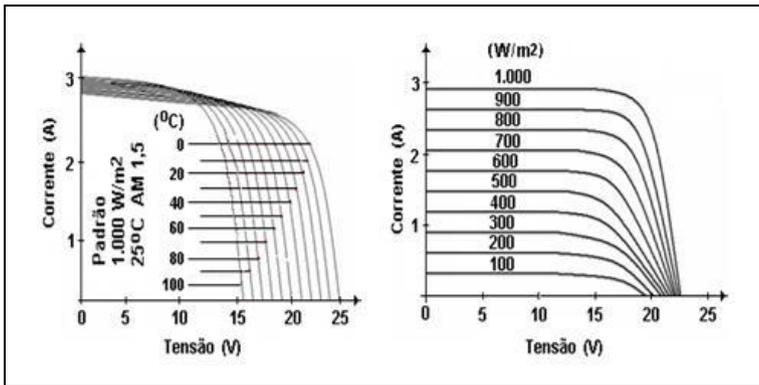


Figura 7. Curvas características de corrente *versus* tensão, em função da temperatura (a) e da intensidade luminosa (GHENSEV, 2006).

O aumento da temperatura reduz o *gap* e aumenta a corrente, favorecendo a adsorção de fótons com energia mais baixa. Contudo, a perda em tensão é proporcionalmente mais significativa, fato que induz a uma diminuição do rendimento final da célula solar (NELSON, 2010).

É conclusivo que as células perdem eficiência em temperaturas elevadas e possuem melhor desempenho em temperaturas mais baixas, portanto, o excesso de calor nem sempre é bem-vindo; porém há um limite para se obter o desempenho máximo. Assim sendo, há que otimizar as condições operacionais de cada sistema fotovoltaico, para maximizar a eficiência do processo.

O índice de absorção de um material indica como este reage à luz incidente e o quanto uma radiação de um comprimento de onda específico pode penetrar ou não no material e ser absorvido. Isso depende, dentre outros fatores, do material disposto na superfície da célula e do comprimento de onda da radiação ou da energia luminosa incidente.

Segundo Al-Mohamad (2004), um coletor ou módulo fotovoltaico recebe o máximo de radiação solar quando a sua incidência o atinge em ângulos retos. Pequenas inclinações resultam numa menor coleta da energia pelo módulo fotovoltaico. Portanto, o ângulo de inclinação ideal para um sistema de energia solar depende da latitude. Coletores fixos ou módulos de produção de calor ou eletricidade, são normalmente instalados e inclinados em um ângulo igual à latitude do local em que o coletor ou módulo está em relação ao Sol. A incidência da radiação solar na perpendicular à superfície é considerada a ideal.

De forma geral, a energia coletada depende dos níveis de radiação incidente, da temperatura, etc, pois existem lugares onde as chuvas ocorrem no verão e não no inverno. No entanto, em tais casos, é desejável que a coleta média anual de energia seja maximizada, isto é, a posição angular do coletor ou o módulo esteja ajustado para receber o máximo de energia e as perdas por reflexão sejam mínimas. Sabe-se que a célula reflete a radiação incidente em todas as direções, em contraposição, só absorve a luz solar em uma faixa angular muito pequena, cuja utilização otimizada torna-se determinante à eficiência da conversão.

Um mecanismo de rastreamento do Sol que proporciona um aumento da quantidade de energia solar incidente sobre módulo fotovoltaico foi desenvolvido por Al-Mohamad (2004). Isso proporcionou um melhor aproveitamento da radiação incidente, resultando numa potência de saída maior, promovendo aumento no desempenho do módulo fotovoltaico.

4 | MATÉRIA-PRIMA BÁSICA PARA OBTENÇÃO DE SILÍCIO SOLAR

O quartzo é a matéria-prima mais utilizada para obtenção de silício que, por meio da redução carbotérmica, se obtém o silício grau metalúrgico-SiGM. Este é produzido, atualmente, pela MINASLIGAS, numa escala de 40.000 t/ano, na localidade denominada Pirapora, às margem do Rio São Francisco, estado de Minas Gerais e destina-se, principalmente, às indústrias de ligas de alumínio para fundição, utilizadas nas indústrias automobilísticas, aeronáuticas; na indústria química para fabricação de resinas, silicones e lubrificantes (TONNESEN et al., 2011).

O quartzo é um mineral, cuja composição química consiste de dois átomos de oxigênio e um de silício, ou seja, (46,7% de silício e 53,3% de oxigênio). A sua estrutura cristalina é trigonal composta por tetraedros de sílica, entretanto, o quartzo é formado por vários tetraedros de sílica, constituindo um octaedro, ou seja, enquanto a sílica é um composto químico, o quartzo é um mineral. Este mineral ocorre em pegmatitos, veios hidrotermais, etc. Dentre as suas propriedades, a mais notável é a piezoelectricidade, capacidade de polarização elétrica quando sofre solici mecânicas ou o inverso.

Na natureza, o mineral ocorre como uma das formas polimórficas da sílica, coexistindo de maneira metaestável com a cristobalita (tetragonal) e a tridimita (hexagonal). O quartzo também pode ser cultivado em autoclaves com base no crescimento hidrotérmico que fundamenta-se na recristalização do quartzo natural em solução aquosa à pressão e temperatura elevadas, semelhante à cristalização hidrotermal dos minerais quando são formados no interior da crosta terrestre. Apesar de

ser considerado um mineral de alta pureza, no quartzo natural são encontrados traços de alumínio, manganês, boro, molibdênio, cálcio, níquel, magnésio, zircônio, vanádio, ferro, titânio, cobre, fósforo, cromo e outros.

O quartzo também ocorre nas formas de blocos de cristal de rocha natural, lascas de quartzo, quartzitos e areias de quartzo. As lascas de quartzo são usadas como sementes no crescimento de quartzo sintético, cultivado em autoclave (GUZZO, 2008), ou são processadas, cortadas e caracterizadas, adequando-as às especificações demandadas pelo uso de cristais piezoelétricos (BARBOSA, 1995; MORI, 2007).

As lascas de quartzo são classificadas em seis classes, cujo critério de classificação é o grau de transparência, por meio de observação visual ou por espectroscopia óptica. Desse modo, tem-se a classificação a seguir.

As lascas de primeira classe são totalmente transparentes, sem inclusões e fissuras internas. As lascas de classes subsequentes possuem menor transparência e maior número de defeitos. Lascas de terceira a quinta classe são usadas na produção de SiGM visando à sua purificação para obter o SiGS (MME, 2009).

O silício na forma pura, ou em compostos, possui as mais diversas aplicações, dentre outras, destacam-se, nas indústrias de:

- aços de dureza elevada, tenacidade e resistência a ácidos e outros reagentes;
- na fabricação de ligas com alumínio para uso nas indústrias automobilística, da construção civil e outras;

- vidros, cimentos, cimentos amianto;
- silicones (resina, emulsão ou na forma fluida);
- semicondutores para vários segmentos da indústria eletrônica;
- eletroeletrônicas, fotovoltaicas e metalúrgica com a produção dos silícios - SiGE, SiGS, SiGM.

O silício ocorre na crosta terrestre sempre na forma de óxidos e silicatos. O silício é um metal semicondutor e, quando no estado puro, tem cor cinza e não é bom condutor elétrico. As impurezas existentes na estrutura do silício grau solar são responsáveis parciais pela condutividade desse semicondutor. Uma parte delas provém do próprio quartzo ou foram incorporadas ao silício durante as etapas de purificação/obtenção do silício grau solar.

Este elemento se tornou o semicondutor mais usado na produção de células fotovoltaicas, por várias razões, dentre outras, ao seu caráter semicondutor, incluindo a facilidade de dopá-lo no estado puro, para fabricação da célula fotovoltaica.

4.1 | Caracterização tecnológica da matéria-prima

A caracterização, com foco no beneficiamento de minério, investiga o conjunto das características do minério e permitem antever ou especificar, com segurança, as alternativas tecnológicas de tratamento do bem mineral. Como o beneficiamento, em essência, tem por fim a separação dos constituintes minerais do minério, a caracterização inclui os conhecimentos da matéria-prima mineral relativos aos seus constituintes e é conhecida como mineralogia aplicada ao

beneficiamento. Nesta abordagem, pode-se incluir o estudo das características do minério, em especial seus índices tecnológicos.

O conhecimento das diferentes etapas de beneficiamento e da importância das características e propriedades dos minerais que constituem o minério são essenciais às etapas posteriores do processamento. Com essas informações, consegue-se até prever, com certa segurança, tanto a recuperação como os desafios que, certamente, ocorrerão no desenvolvimento dos estudos de beneficiamento. Os resultados das investigações mineralógicas qualitativas e quantitativas, associadas àquelas advindas das análises químicas, tanto via úmida como instrumental, devem ser consideradas como parte essencial dos estudos. Desse modo, torna-se possível planejar as seqüências e/ou etapas adequadas ao processamento, com economia de tempo e trabalho.

No caso do silício, sabe-se que a sua concentração na crosta terrestre é da ordem de 25% e está distribuída nos silicatos, no quartzo, entre outros. Além de pertencer ao grupo dos minerais mais abundantes na crosta terrestre, o quartzo pode ser encontrado na natureza com elevado grau de pureza. Esta é uma das razões porque o mineral quartzo tornou-se a matéria-prima básica para obtenção do silício grau metalúrgico (SiGM), que após purificação, de custo elevado, obtém-se o silício grau solar (SiGS).

Na redução carbotérmica do quartzo, para obtenção do silício grau metalúrgico, prefere-se utilizá-lo na granulometria entre 10 e 100 μm , com alta pureza. Observa-se nesta etapa do processo que, em geral, não há uma atenção especial à qualidade da matéria-prima, isto é, do quartzo. De modo

análogo, a matéria-prima redutora (carvão metalúrgico, coque de petróleo, carvão vegetal, lascas de lenha e outros), também, não é selecionada com os critérios necessários à maximização do desempenho do processo para obtenção de um produto final de qualidade, ou seja, o SiGM melhorado. O resultado é a complexidade do processo de obtenção do SiGS, com base no SiGM e a elevação do custo final do produto.

Nesta abordagem, pode-se afirmar que a primeira etapa do processo para o estudo de um quartzo de alta pureza, com foco na obtenção de silício solar, em qualquer uma das suas formas, deve se iniciar pela seleção adequada da fonte natural de quartzo, ou seja, da jazida.

Portanto, devem ser considerados fatores inerentes às jazidas e ao próprio mineral, dentre outros, destacam-se:

- acesso, disponibilidade e potencialidade de reservas para fornecimento de um produto mineral, sempre com as mesmas características químicas e físicas;
- estado de alteração do corpo mineralizado e sua composição química;
- associações mineralógicas, inclusões fluídas, teores e natureza dos contaminantes do quartzo;
- mineralogia e granulometria dos minerais associados ao quartzo, considerados como impurezas.

As identificações e quantificações dos minerais são determinadas pela conjugação de técnicas de análises químicas (por via úmida e instrumental), somada àquelas

relativas às análises mineralógicas e, por último, os dados resultantes dos ensaios de concentração/separação dos constituintes mineralógicos do minério, dentre outras.

Assim, o procedimento experimental para caracterização de um minério varia caso a caso; por essa e outras razões é considerada um estudo e não um conjunto de operações laboratoriais. No caso do quartzo, com foco no seu aproveitamento para produção do silício solar, são usadas as mesmas técnicas convencionais de caracterização, entretanto, há que considerar análise química de impurezas da ordem de ppm, ou seja, um fator limitante.

Diferentes técnicas de caracterização química e mineralógica estão disponíveis, para a obtenção de informações com variados níveis de confiabilidade, necessárias para acompanhamento e avaliação de processos e produtos (NEUMANN et al., 2010; BERTOLINO et al., 2018).

5 | PRODUÇÃO DE SILÍCIO GRAU SOLAR – SiGS

O SiGM (silício grau metalúrgico), matéria-prima de partida e a mais usada na produção do SiGS (silício grau solar), possui um teor de Si entre 98,70 e 99,50%. A sua obtenção se dá pela redução carbotérmica do quartzo por agentes redutores em fornos a arco elétrico, para produção em larga escala. Na Tabela 1, relacionam-se os teores típicos das impurezas existentes num SiGM. Observa-se que o nível de impurezas é da ordem de ppm, com destaque para os teores dos elementos dopantes do SiGS, boro e fósforo. Estas impurezas são relevantes e torna-se necessária a sua remoção para, em etapas subsequentes, serem adicionadas em concentrações bem definidas e controladas, por se tratarem de agentes dopantes.

Tabela 1. Principais impurezas do SiGM com destaque para os teores de boro e fósforo (ERGÜI, 2010).

ELEMENTOS	CONCENTRAÇÃO (ppm)	ELEMENTOS	CONCENTRAÇÃO (ppm)
Alumínio	1200-4000	Zircônio	30
Manganês	70-8-	Vanádio	100-200
Boro	37-45	Ferro	1600-3000
Molibdênio	< 10	Titânio	150-200
Cálcio	590	Cobre	24-90
Níquel	40-80	Fósforo	27-30
Cromo	50-140	-	-

A empresa REC Solar Norway (antiga Elkem Solar) produz sua própria matéria-prima, o SiGM. Quando líquido, realiza um tratamento da escoria com CaO-SiO_2 , contendo 5-30% de SiO_2 .

para remover boro e fósforo a índices de pureza entre 0,2 e 10 ppm, assim como outras impurezas (ENEBAKK, 2007).

Um material típico para produção do silício grau metalúrgico e posterior obtenção do SiGS, é o quartzo de pureza elevada, geralmente, com teor de SiO₂ entre 98,5 a 99,5% ou mais. Como já mencionado em itens anteriores, várias são as aplicações do SiGM, dentre outras, as mais relevantes:

- produção de ligas metálicas e em fundições;
- na indústria química e na preparação de polímero (silicone);
- nas indústrias de cerâmica, vidro, isolantes, carbetos, abrasivos;
- como carga em materiais de revestimento e compósitos de cimento;
- na indústria eletrônica e microeletrônica, como material básico para a produção de transistores.

Quando usado como matéria-prima para produção do silício eletrônico e do SiGS, exige-se que o SiGM seja submetido a etapas e/ou processos adicionais de purificação, em decorrência do nível de pureza exigido para esses fins.

Na produção do silício grau metalúrgico de pureza elevada, adiciona-se ao forno o quartzo, que pode ser obtido da britagem/moagem de lascas de quartzo, previamente caracterizadas, e os redutores carvão vegetal, coque e madeira (cavaco). O cavaco é usado para melhorar a permeabilidade da carga ao contra fluxo dos gases gerados. O forno a arco elétrico é o único equipamento usado para produzir o SiGM em escala industrial, cujo processo é ilustrado na Figura 8.

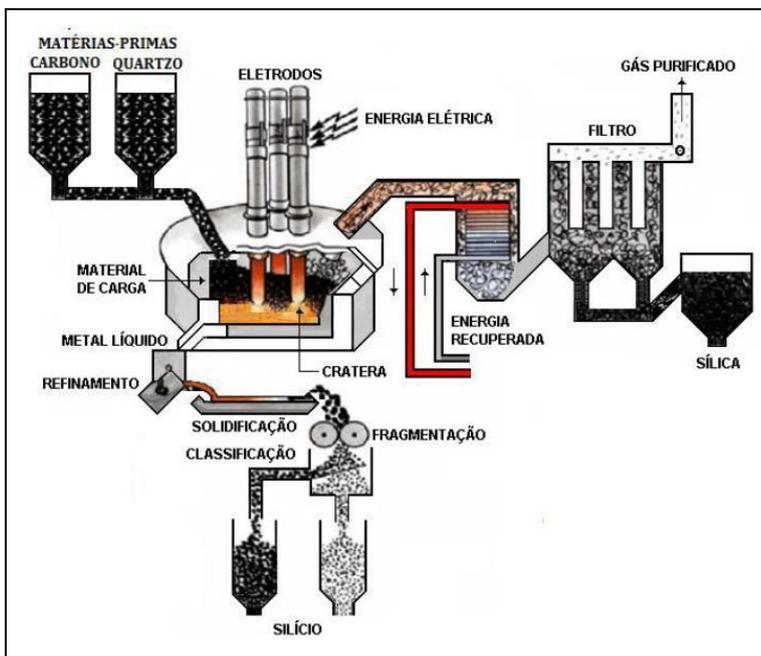
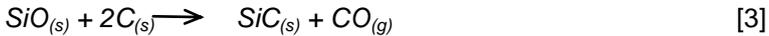
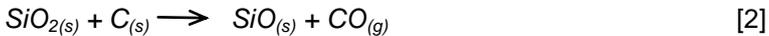
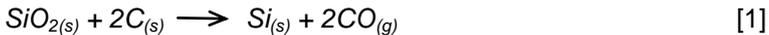


Figura 8. Esquema ilustrativo de um processo de obtenção de silício grau metalúrgico (MYRVAGNES, 2008).

A redução carbotérmica do quartzo ocorre em fornos a arco elétrico com topo aberto, em geral, com diâmetro duas vezes maior que a profundidade e sua potência máxima pode atingir cerca de 25 MW. A energia fornecida, através dos eletrodos, é prontamente absorvida pela carga, na qual, há formação de um gradiente de temperatura entre o topo e a base da mesma. Este aquecimento promove a fusão de toda a carga a uma temperatura que pode atingir o valor de 1.800°C , conforme equação simplificada (Equação 1) do processo de redução.

A eficiência do processo está relacionada à potência de operação, posição dos eletrodos, além da porosidade da carga; estes fatores devem ser controlados para o êxito do processo, dentre outros. Além disso, deve-se atentar para a complexidade do processo, pois há a formação de produtos intermediários, como exemplo, SiC e SiO (Equações 2 e 3).



Os fornos, em geral, são divididos em zonas de temperatura alta e baixa, que também são indicadas como as zonas interior e exterior de reações, respectivamente. Na produção do silício grau metalúrgico ocorrem reações químicas na zona de alta temperatura do forno, próximas aos eletrodos. O silício fundido produzido se acumula na região inferior do forno, de onde é vazado por meio de uma descarga. No produto primário, encontram-se elevados teores de contaminantes como cálcio, ferro e alumínio, oriundos da redução de seus óxidos (QUEIROZ DA SILVA, 1999).

O CO e o SiO são produzidos em grandes quantidades no interior do forno e resultam em cavidades (crateras) ao redor dos eletrodos, causando perda de eficiência do processo, pois dissipam o calor gerado pelos eletrodos.

O SiO é um componente intermediário na obtenção de silício líquido, precisa ser recuperado com o carbono na parte superior do forno, para formar SiC (Equação 3) e também CO (SERODIO, 2009).

O SiC reage com SiO₂ fundido (Equação 4) produzindo o silício desejado que se deposita no fundo do forno. O silício fundido é removido do forno e solidificado. O silício, assim obtido, possui um grau de pureza superior a 99%, dependendo da pureza da matéria-prima utilizada no processo.



A redução do silício é um processo associado a várias reações que exigem condições especiais de operação, como correto balanço de carbono, porosidade suficiente da carga no forno, boas condições de vazamento (sangria), inclusive matéria prima de qualidade (QUEIROZ DA SILVA, 1999).

Dentre outras, as variáveis operacionais mais importantes associadas aos fornos a arco elétrico são: profundidade dos eletrodos, velocidade de remoção do silício metálico do interior do cadinho e proporção relativa de carvão ou matéria-prima redutora (QUEIROZ DA SILVA, 1999).

Sobre o processo de obtenção de silício grau solar, pela redução carbotérmica, seu principal desafio é o consumo de energia e de matéria-prima para produzir o SiGM. A título de exemplo, para produzir 1.000 kg de SiGM são requeridos de 2.500-2.700 kg de quartzo, 600 kg de carvão vegetal, 600-700 kg de carvão mineral ou coque, 300-500 kg de lascas de madeira e 500.000 kWh de energia elétrica (BARRON, 2010).

6 | PROCESSO DE PURIFICAÇÃO DO SILÍCIO

6.1 | Processo Siemens

Este processo foi desenvolvido na Alemanha na década de 1950 e consiste na passagem do gás clorídrico (HCl) aquecido a 300°C, através de silício grau metalúrgico granulado, produzindo clorosilanos que depois são separados por destilação fracionada. Na Figura 9 estão ilustradas, por meio de diagrama de blocos, as etapas principais do processo Siemens para obtenção do SiGS.

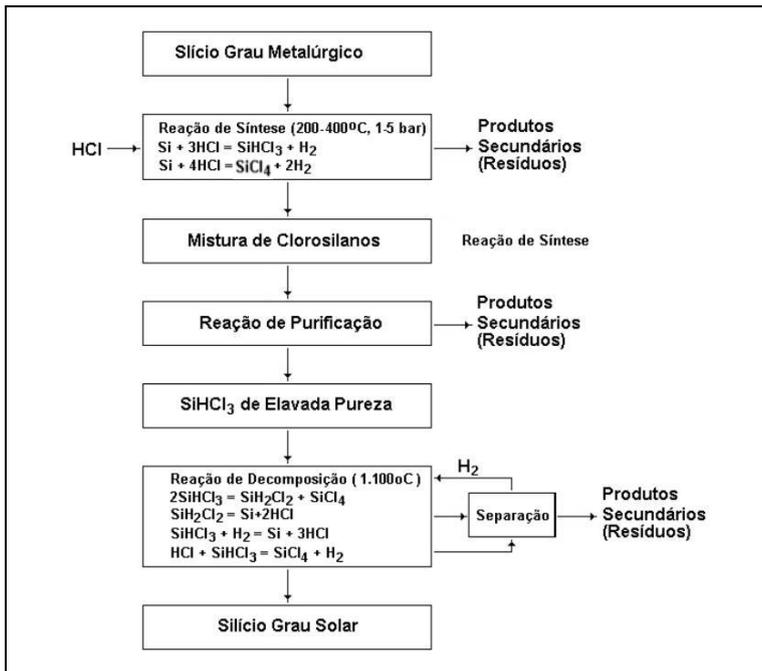
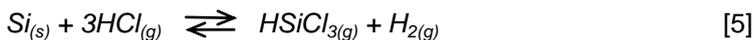


Figura 9. Esquema ilustrativo do processo Siemens para obtenção de silício grau solar (RECAMÁN PAYO, 2008).

O silício metalúrgico, moído a uma granulometria com 75% abaixo de 40 μm , alimenta um reator de leito fluidizado, ao qual se adiciona HCl anidrido, na forma gasosa. Com isso, promove-se a formação de triclorossilano e hidrogênio, conforme a Equação 5.



Desde que a reação esteja em equilíbrio, a formação de SiHCl_3 é altamente exotérmica, o que torna necessária a remoção do calor gerado para garantir um rendimento máximo na formação de SiHCl_3 , porque a 300°C a produção do triclorossilano é favorecida sobre os demais silanos formados (BARRON, 2010).

A reação produz vários silanos no leito fluidizado e depois são submetidos a uma série de processos de destilação para separação do triclorossilano, tetracloreto de silício, diclorossilano e também para remover cloretos metálicos de quaisquer impurezas. Em particular ferro, alumínio e boro são removidos como FeCl_3 , AlCl_3 e BCl_3 , respectivamente. A destilação fracionada de SiHCl_3 , com base nesses cloretos, resulta num aumento expressivo da pureza do Si, com uma concentração de impurezas eletricamente ativas de menos de 1,0 ppb (RECAMÁN PAYO, 2008).

Nesse processo de destilação fracionada, o baixo ponto de ebulição do triclorossilano, 31,8°C, permite uma purificação muito eficiente, visto que a maioria das impurezas contidas na mistura de clorosilanos possui baixa volatilidade. Tratamento de água pode ser usado para remover impurezas tais como BCl_3 pela sua adsorção sobre os produtos de hidrólise de SiHCl_3 (ANDRADE, 2011).

O SiHCl_3 de alta pureza é vaporizado, diluído com hidrogênio de alta pureza, e introduzido no reator. Na Figura 10, consta uma representação esquemática de um reator utilizado na deposição de silício policristalino .

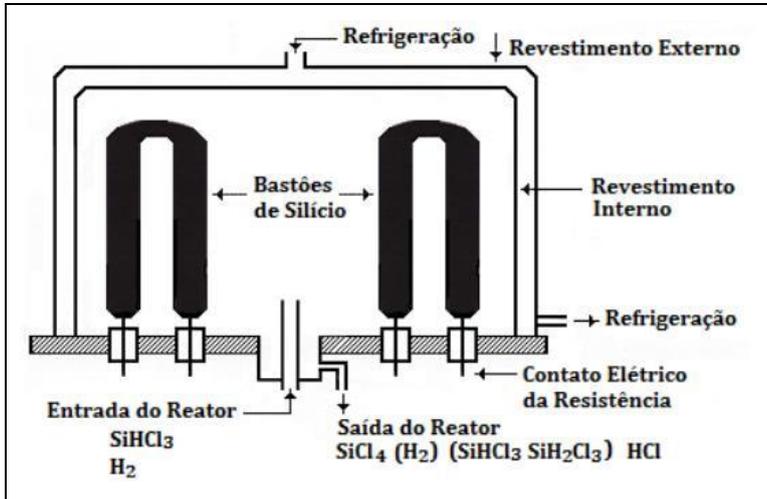
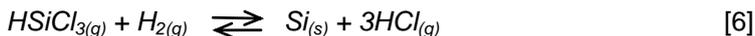


Figura 10. Diagrama ilustrativo de um reator, modelo em U, para deposição de silício policristalino (RECAMÁN PAYO, 2008)

O triclorossilano gasoso flui em um filtro e, em seguida, no reator CVD (*chemical vapor deposition*); enquanto isso, insere-se hidrogênio no reator catalítico e a deposição de silício ocorre em temperaturas da ordem de 1.100°C .

A reação de deposição é feita em reatores do tipo U, em que filamentos de silício montados em um arranjo na forma de ponte são aquecidos por corrente elétrica e esse aquecimento causa a decomposição do SiHCl_3 para produzir silício. A barra inicial serve de catalisador, segundo a reação química expressa na Equação 6.



Essas estruturas em forma de U invertido vão se espessando enquanto a reação ocorrer e podem durar vários dias. O deslocamento do equilíbrio, formando $SiHCl_3$ com base em Si ocorre em baixas temperaturas, com base nas Equações 7 e 8.

$$\ln(K\rho) = \frac{-\Delta G_0}{RT} \quad [7]$$

$$K\rho = \frac{\rho(HSiCl_3) \cdot \rho(H_2)}{\rho(HCl_3)} \quad [8]$$

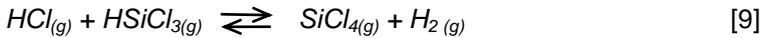
Como a formação do $SiHCl_3$ é exotérmica ($\Delta H < 0$), um aumento da temperatura reduz a pressão parcial de $SiHCl_3$ (Equações 7 e 8). Por essa razão, o processo Siemens, geralmente, é executado em temperaturas de 1.100°C , enquanto o processo de leito fluidizado é realizado a 300°C .

Os filamentos de silício, no reator em U invertido, agem como ponto de nucleação à deposição de silício, resultando numa barra policristalina de silício que é constituída de grãos colunares que crescerão perpendicularmente à barra.

A conversão nunca é completa, desse modo, tanto o $SiHCl_3$, como outros produtos são parcialmente utilizados para reaproveitamento. O crescimento ocorre a taxas menores que $1,0 \text{ mm/h}$. Após 200 a 300 h de deposição, são produzidas barras de 150-200 mm de silício de alta pureza, ou seja, SiGS.

Além da formação de silício, o co-produto HCl reage com o $SiHCl_3$ e forma tetracloreto de silício ($SiCl_4$) e hidrogênio como subprodutos mais importantes do processo. Esse fato

compromete a eficiência do processo, porque apenas 30% de silício, dentro do reator, é convertido em silício de alta pureza, conforme a Equação 9.



Os produtos residuais, ou que não reagiram (H_2 , HCl , $SiCl_4$, e $SiHCl_3$), são separados e recuperados para reciclagem. O custo da produção do silício grau solar depende da aplicação comercial do $SiCl_4$ (BARRON, 2010).

O silício policristalino obtido pelo processo Siemens, após a devida caracterização química, pode ir direto para o reator Czochralski (CZ), visando à produção do silício monocristalino.

No processo Siemens, destacam-se, dentre outras, as seguintes limitações:

- os clorossilanos, assim como o ácido clorídrico, resultantes do processo, são compostos tóxicos e corrosivos, causam irritações na pele e na mucosa;
- elevado consumo de energia, devido à elevada temperatura de operação, de $1.100\text{ }^\circ\text{C}$.

6.2 | Processo Union Carbide

O processo foi desenvolvido entre 1970 e 1980 pela empresa Union Carbide Corporation, e financiado pelo governo dos EUA por meio do projeto *Low Cost Solar Array*. A finalidade do projeto foi desenvolver um novo processo de purificação de silício capaz de superar as principais limitações do processo Siemens. Este processo consiste em uma hidrogenação de $SiCl_4$ e silício grau metalúrgico em um reator de leito fluidizado. É possível produzir SiGS a um custo menor, com uma

demanda de energia da ordem de 80-90% menor que o método tradicional de refino de silício da Siemens (REC Group). O diagrama de blocos da Figura 11 ilustra as etapas do processo desenvolvido pela Union Carbide Corporation.

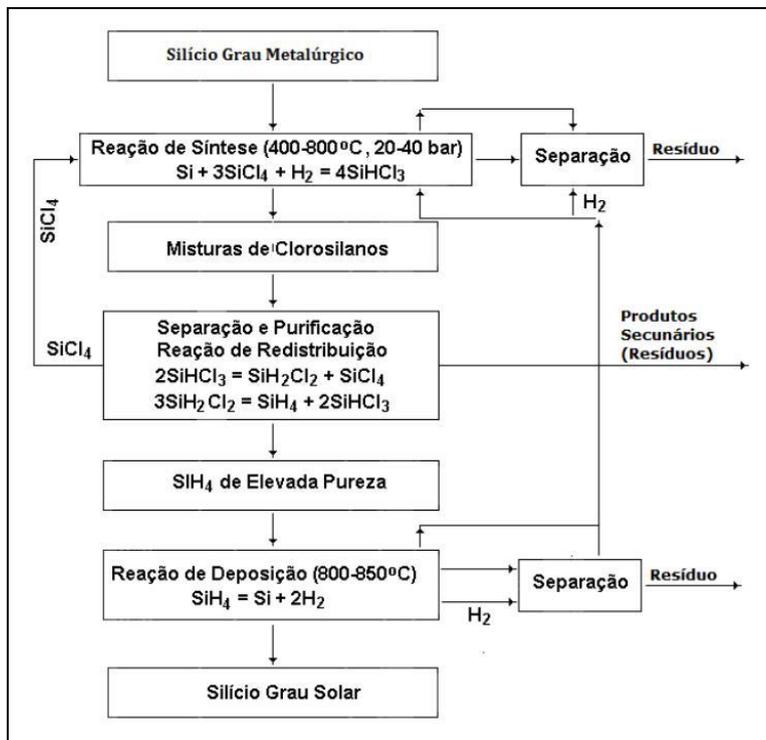
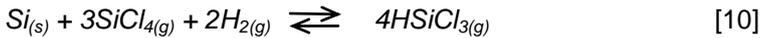


Figura 11. Diagrama ilustrativo do processo Union Carbide (RECAMÁN PAYO, 2008).

O processo consiste na hidrogenação do tetracloreto de silício e do SiGM, em um reator de leito fluidizado. Grãos de semente de silício purificado são alimentados em uma câmara com gás silano aquecido. A taxa de injeção do gás deve ser o suficiente

apenas para promover a suspensão das partículas de silício, formando o leito fluidizado, conforme pode ser visto na Figura 12. Nesta etapa, as partículas crescem até certo peso, o suficiente para que essas sigam a trajetória descendente no leito fluidizado e são coletadas como produto na extremidade inferior do forno. Nesta etapa há a formação do triclorossilano (SiHCl_3), conforme a Equação 10. Como se trata de processo contínuo, novas sementes e gás são introduzidos na câmara. O triclorossilano é separado por destilação, enquanto, o tetracloreto de silício residual é reciclado e retorna ao reator de hidrogenação (REC Group).



O processo requer o aquecimento das partículas a uma temperatura mais elevada que a média do leito, para facilitar a transferência de calor.

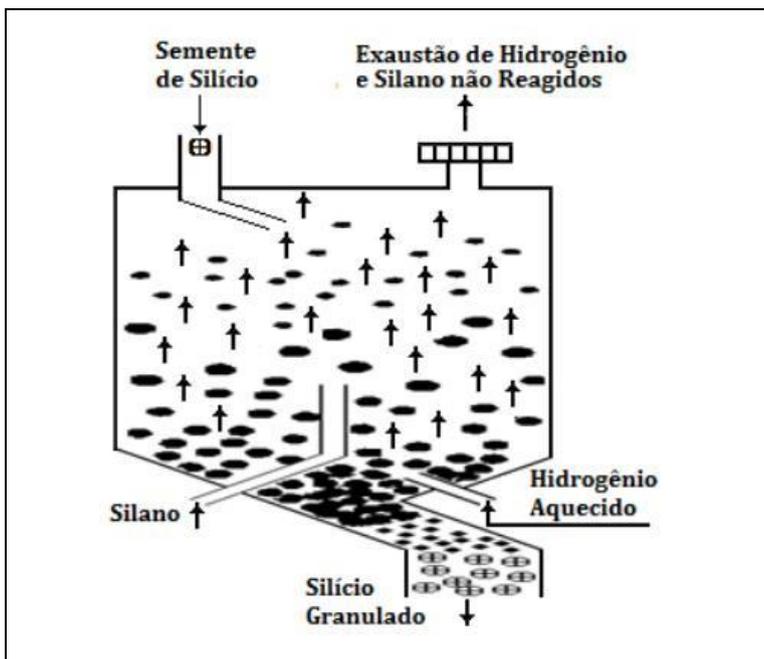


Figura 12. Diagrama simplificado de um reator de leito fluidizado.

Etapas de separação por filtração e condensação são necessárias para eliminar sólidos e gases não condensáveis como o hidrogênio, o efluente da reação é composto, essencialmente, por tetracloreto de silício e triclorossilano, como mostrado nas reações a seguir (Equações 11 e 12).



Então, este fluxo de clorosilanos é submetido a uma nova separação de fases e purificação por destilação reativa. Nessa fase, o triclorossilano é transformado em silano por sucessivas reações de redistribuição e também separa os produtos

indesejáveis, por exemplo, tetracloreto de silício. Reações de redistribuição, que podem ser simultâneas com a separação por destilação, são reações de equilíbrio que requerem a existência de resinas de troca iônica com os grupos funcionais tipo amina terciária (NR_3^+) ou quaternária de amônio (NR_4^+) (RECAMÁN PAYO, 2008).

Nesta fase de separação e purificação, obtém-se um fluxo de tetrassilano de alta pureza, o que leva a um reator de deposição em fase de vapor que se decompõe para produzir silício muito puro e hidrogênio, segundo a Equação 13 (Serodio, 2009).



Algumas vantagens estão associadas ao processo Union Carbide em relação ao processo Siemens, como nos casos a seguir:

o processo UC permite a recirculação de produtos/subprodutos para outras etapas do processo. A pirólise do silano pode ser realizada em temperaturas bem mais baixas e o produto final é uniforme, denso e livre de vazios, que o torna vantajoso à produção de monocristais de silício pelo processo de fusão zonal (FZ) (SERÓDIO, 2009). Em contraposição, o método promove uma operação de natureza química muito agressiva sob alta pressão e temperatura. Essas condições requerem a utilização de materiais com elevada resistência química e mecânica, custos de processo mais elevados, até mesmo, pode levar à formação de produtos secundários como o cloro, além de agredir o meio ambiente (RECAMÁN PAYO, 2008). Portanto, cuidados especiais com a segurança desse processo são essencialmente requeridas.

O alto custo do processo é outro fator negativo, sendo necessárias etapas adicionais para converter o triclorossilano em silano. Soma-se, ainda, o fato de que é preciso mais triclorossilano, cinco a seis vezes, para o processo, que a quantidade de SiGS produzido; o desperdício é muito elevado.

6.3 | Processo *Ethyl*

Foi desenvolvido pela Ethyl Corporation e é um processo similar ao da Union Carbide, porém de menor aplicação. Esse processo usa o silano como fonte de silício, entretanto, ao contrário do processo da Union Carbide, o SiGM não é utilizado como matéria-prima inicial e sim tetrafluorossilano, produto secundário da indústria de fertilizantes e, potencialmente, de baixo custo.

Inicialmente, o tetrafluorosilano é transformado em silano, por meio de reação com hidretos metálicos, segundo as reações apresentadas nas Equações 14 e 15.



nas quais: M pode ser Na ou Li.

Posteriormente, o SiH_4 é termicamente decomposto para silício em um reator de leito fluidizado sustentado por um fluxo de gás de silano e hidrogênio (Equação 16).



O uso de tais reatores permite a operação contínua e também reduz, de modo expressivo, o consumo de energia. Contudo, a tecnologia ainda carece de avanços e controles caracterizados por dificuldades na sua implementação. Ademais, durante a

decomposição de silano ao silício ocorre, com frequência, a contaminação por adsorção de hidrogênio sobre silício depositado. No diagrama de blocos da Figura 13 estão ilustradas as etapas do processo Ethyl (RECAMÁN PAYO, 2008).

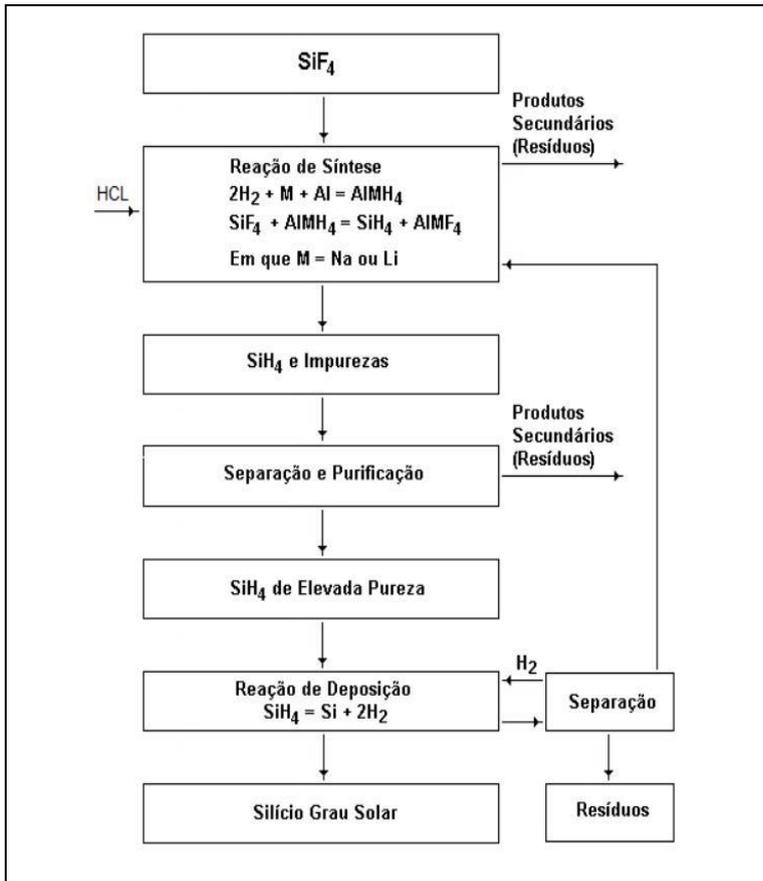


Figura 13. Diagrama de blocos relativo às etapas do processo Ethyl (RECAMÁN PAYO, 2008).

6.4 | Processo Elkem

A Elkem é uma empresa norueguesa que foi adquirida pela Blue Star (China) e um dos principais fornecedores mundiais de silício grau metalúrgico. A Elkem desenvolveu uma rota metalúrgica para produção de SiGS, à base de SiGM, passando por cinco estágios. O propósito da empresa é aumentar a competitividade da energia solar com a produção de SiGS a baixo custo. Na Figura 14 consta um esquema ilustrativo das etapas do processo Elkem.

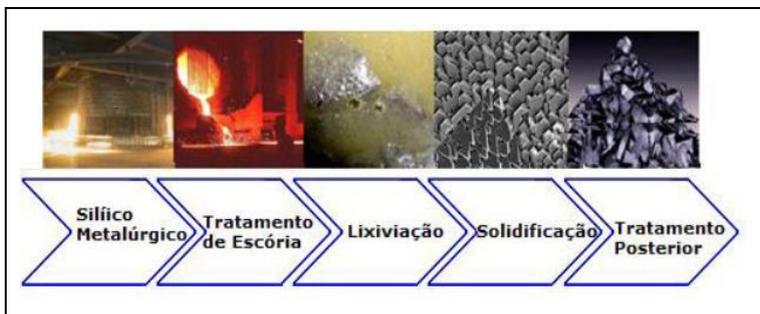


Figura 14. Esquema ilustrativo das etapas relacionadas ao processo Elkem (VITENSKAPSAKADEMI, 2007).

Essa rota de processo, segundo Vitenskapsakademi (2007), caracteriza-se por:

- baixo consumo de energia;
- baixo custo em escala;
- não há passagem de gás silano;
- cada etapa do processo foi comprovada em escala piloto ou industrial.

A Elkem produz sua própria matéria-prima, o silício grau metalúrgico, quando líquido, realiza um tratamento da escória com CaO-SiO_2 , contendo 5-30% de SiO_2 para remover boro e fósforo com índice de pureza entre 0,2 e 10 ppm, assim como outras impurezas (US PAT 20070128099A1). O pó de silício grau metalúrgico com granulometria de 70 μm ou menor, é então tratado com soluções ácidas (HCl e HF a 2,5%). A lixiviação ocorre em borbulhamento de H_2 à temperatura de 80°C por 2,0 h. Nessa etapa, observa-se a diminuição de elementos nos contornos de grão.

Após a lixiviação, o produto derivado é fundido num cadinho de quartzo de alta pureza, para minimizar a contaminação. O silício é solidificado de forma direcional para que as impurezas, com baixo coeficiente de segregação, situem-se na última região a solidificar. A parte em contato com o cadinho é removida devida à contaminação com SiO_2 , entretanto é possível reduzir a contaminação se a solidificação for feita sob vácuo. Uma etapa adicional de fusão e ressolidificação pelo método Czochralski ou por fusão zonal aumentam ainda mais o grau de pureza, além de transformar um silício policristalino em monocristalino, permitindo a construção de células fotovoltaicas com eficiência de 15-16% (SERODIO, 2009).

O consumo de energia estimado da rota Elkem é de 25-30 kWh/kg produto, bem inferior ao do processo Siemens, que é da ordem de 160 kWh/kg (SCHIMIDT, 2010).

7 | SILÍCIO MONOCRISTALINO

7.1 | Processo *Czochralski*

O processo Czochralski (CZ), desenvolvido pelo polonês Jan Czochralski, baseia-se no crescimento de monocristais de semicondutores, em uma atmosfera inerte (argônio), e obtém-se, como produto final, um silício monocristalino com pureza entre 99,99 e 99,999999%. O processo CZ não foi desenvolvido para purificação de Si, pois essa pureza final depende da matéria prima alimentada no forno.

Neste método, utiliza-se um cadinho de quartzo de alta pureza como reator, no qual uma amostra de silício policristalino é adicionada e aquecida até a fusão (1.500⁰C). Nesta fase, também são adicionados, em proporções bem definidas, os elementos dopantes, geralmente, fósforo e boro, necessários à formação de um semicondutor, pois o silício puro não é um bom condutor. A semente consiste de uma amostra de silício monocristalino de diâmetro pequeno e de orientação cristalográfica específica. Estas são as características principais do material que se deseja obter por meio deste processo. Quando a amostra de silício (semente) toca o silício fundido no interior do cadinho, ocorre um resfriamento na superfície do silício fundido, iniciando-se o processo de cristalização. Isto é, a semente, presa a uma haste, começa a crescer e forma o silício monocristalino, a finalidade do processo. Quando a semente começa a crescer é, então, levantada, a uma velocidade da ordem de cm/h. A transferência de calor irá direcionar o arranjo atômico do cristal original, isto é, da semente. Assim, os movimentos rotacionais (em sentidos contrários) da semente presa à haste e do cadinho, conferem

ao produto final, tarugo de diâmetro controlado, a mesma orientação cristalográfica da semente. O diâmetro do tarugo é função inversa da velocidade de rotação, inclusive da tração vertical da haste com a semente (CHO, 2006; GHENSEV, 2006; PROENÇA, 2007).

Este procedimento dá origem a um grande lingote (tarugo) monocristalino, mediante o controle de variáveis operacionais como: gradiente de temperatura, velocidade de retirada da haste e velocidades de rotação, entre outras. Por esse processo, tornou-se possível obter lingotes de silício monocristalino com 300 mm de diâmetro.

Na Figura 15, consta um diagrama ilustrativo das etapas de crescimento do cristal monocristalino durante o processo Czochralski. Como se observa, o sólido resultante deste processo tem sempre a forma geométrica cilíndrica, em decorrência da rotação conferida à haste que contém a semente durante a operação. Por sua vez, a rotação do cadinho proporciona ao material fundido homogeneidade, tanto química quanto térmica.

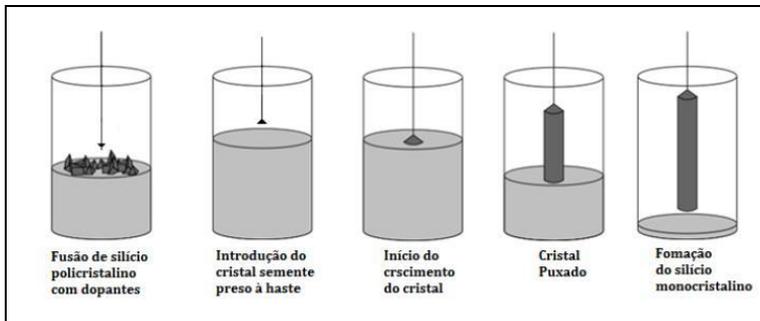


Figura 15. Diagrama ilustrativo das etapas de formação do tarugo monocristalino durante o processo Czochralski.

Na etapa de fusão do silício, partes das paredes do cadinho dissolvem e, portanto, ocorre a contaminação por oxigênio. Entretanto, a presença do oxigênio pode melhorar a resistência mecânica das placas de silício e, conseqüentemente, a deformação plástica. A fusão, sob condições controladas, pode favorecer a formação de precipitados de oxigênio. Estes aprisionam impurezas metálicas indesejadas, segundo o efeito *gettering*, por meio do qual surgem defeitos cristalográficos em regiões que não serão aproveitadas nos dispositivos, para que estes sirvam como sorvedouros de impurezas consideradas contaminantes (PROENÇA, 2007). Na Figura 16, constam detalhes adicionais do forno Czochralski, enfatizando as formas de aquecimento resistivo e indutivo.

Na Figura 17, observam-se as etapas de transformação da estrutura cristalina do silício fundido até o monocristal, em forma de lingote, na situação (c).

Com os lingotes obtidos pelo processo CZ são manufaturadas células monocristalinas. As lâminas ou *wafers* de forma circular são obtidas por meio de um corte transversal do lingote. Na montagem das células são utilizadas lâminas na forma retangular de vértices chanfrados (arredondados) para evitar o desperdício de superfície ao se justapor as lâminas.

O processo CZ permite, por meio do cristal semente sem forma definida, o crescimento do lingote, melhor resistência das lâminas ou *waffers* de silício por causa de maior quantidade de oxigênio, finalmente, o menor custo para produção das lâminas.

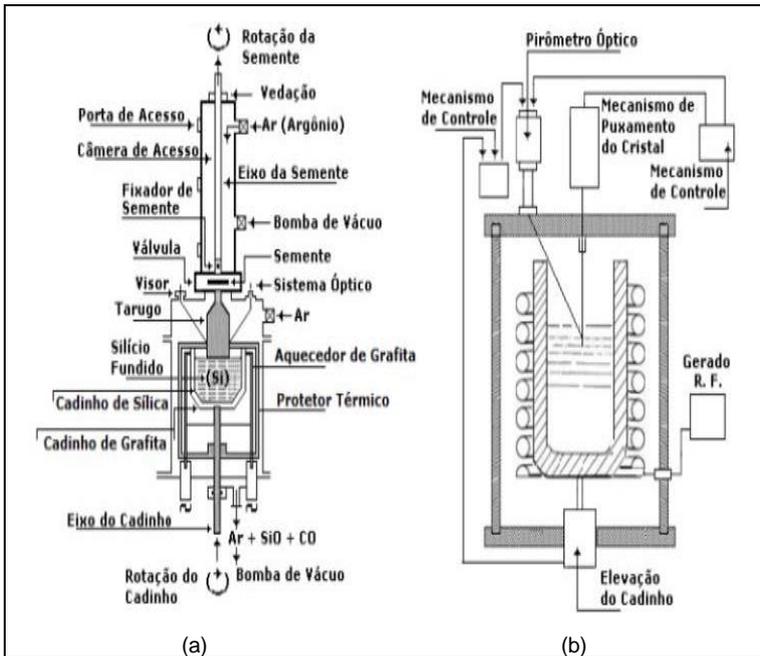


Figura 16. Diagrama esquemático do forno Czochralski com ilustração do aquecimento resistivo (a) e indutivo (b) (SWART, 2010).

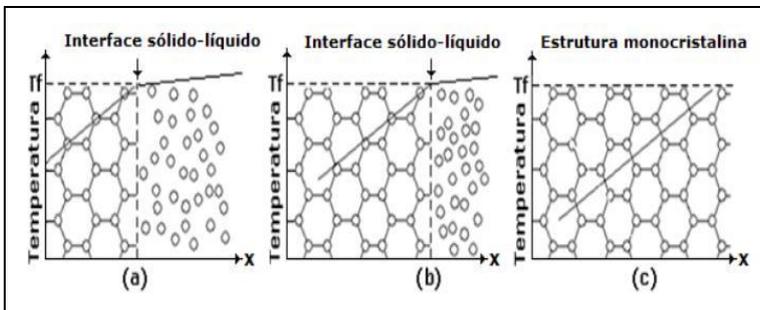


Figura 17. Ilustração esquemática do crescimento de cristal, processo CZ: transformação da estrutura policristalina do silício fundido em uma estrutura monocristalina, evidenciada na situação (c) (SWART, 2010).

Por sua vez, o processo CZ está associado aos desafios de superar as possibilidades de contaminação do lingote pelo cadinho e acelerar o crescimento do lingote, mantendo-se a pureza dos mesmos. Ainda mais, as lâminas, em geral, são cortadas por serragem com fios tão grossos quanto à espessura das lâminas. Esse processo insere perdas significativas de silício na forma de pó, cujo custo de reciclagem é bastante elevado. As alternativas foram promover a cristalização do filme em estágio único, todavia não foi obtido sucesso (RANJAN et al., 2011).

7.2 | Fusão Zonal Flutuante (*Float-Zone*)

A fusão zonal consiste numa alternativa ao processo Czochralski. Essa técnica produz *wafers* com menos oxigênio, reduzindo a vida útil da célula, assim como sua tensão, corrente e eficiência. A técnica, desenvolvida pelo americano William G. Pfann, em 1950, teve por finalidade a purificação de germânio usado em transistor (MOREIRA, 2009). O termo fusão zonal refere-se à família de métodos que controla a distribuição de impurezas num material cristalino.

Em sua essência, o processo de FZ consiste em fundir uma região de uma barra de silício policristalino por aquecimento indutivo e deslocar, lentamente, o foco de calor ao longo da barra que se movimenta em rotação e translação, no qual um cristal de semente é usado em uma extremidade, a fim de iniciar o crescimento do silício monocristalino. Na Figura 18, consta o diagrama ilustrativo do processo FZ (SERODIO, 2009).

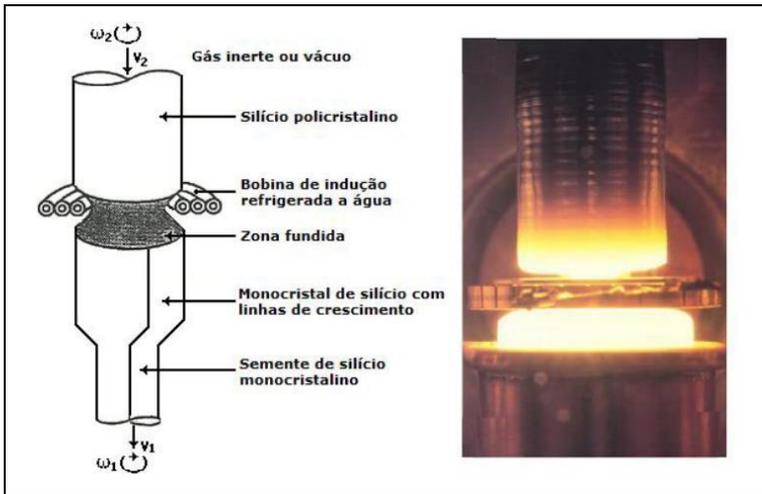


Figura 18. Diagrama ilustrativo do processo FZ (SERODIO, 2009).

O silício se solidifica com uma cristalinidade maior, devido ao arraste na zona fundida sobre o silício policristalino; além disso, as impurezas se segregam no início ou no final do lingote, em função do coeficiente de distribuição de soluto, K , que expressa a relação entre a solubilidade de impurezas no silício sólido e no silício líquido (Equação 17):

$$K = \frac{[\text{impurezas no silício sólido}]}{[\text{impurezas no silício líquido}]} \quad [17]$$

Diagramas de equilíbrio são apresentados na Figura 19. Com base nos valores desse coeficiente, pode-se afirmar que:

- para $K > 1$, a impureza é mais solúvel no silício sólido e segrega-se no início do lingote;
- para $K < 1$, a impureza é mais solúvel no silício líquido e segrega-se no fim do lingote;
- para $K = 1$, não haverá arraste de impurezas.

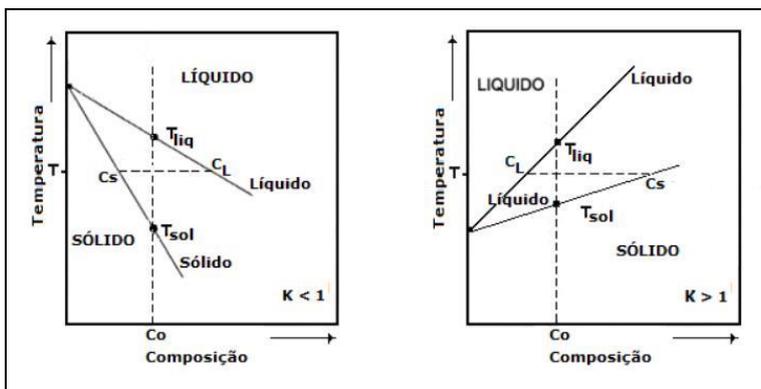


Figura 19. Representação esquemática do diagrama de equilíbrio de ligas binárias: (a) $K < 1$; (b) $K > 1$ (MOREIRA, 2009).

No processo FZ não há utilização de cadinho ou outros equipamentos, a zona líquida é suspensa pela tensão superficial do silício e levitação eletromagnética, atingindo assim índices de impureza muito baixos no lingote. Assim, torna-se possível o controle de impurezas, tamanhos de grãos, entre outros. As impurezas dopantes são adicionadas por duas técnicas principais: injeção de fluxo de gás com elementos dopantes e por reação nuclear (MOREIRA, 2009).

A eficiência da técnica FZ depende de parâmetros como tamanho da zona líquida, número de repetições, velocidade de deslocamento, grau de pureza do soluto no líquido e também do coeficiente de distribuição do soluto (K) (SILVA, 1991 apud MOREIRA, 2009). O processo FZ permite obter a maior taxa de crescimento com ausência de cadinho e de peças consumíveis, proporcionando um ganho econômica no processo. As impurezas tendem a ficar na fase líquida, pois o seu coeficiente de segregação é menor que 1,0. Como consequência, tem-se um deslocamento das impurezas para a

região superior do lingote. Ao se repetir o processo múltiplas vezes e no mesmo lingote, sempre iniciando-se pela mesma extremidade da semente, limpa-se o material, arrastando todas as impurezas para a parte final do tarugo. Em seguida, basta descartar esta parte final, na qual se concentrarão todas as impurezas (SANTOS, 2004; PINTO, 2008; MOREIRA, 2009).

Algumas limitações desse processo são: o custo, a complexidade e a produção lenta de lingotes, exigindo lingotes de forma cilíndrica e uniforme, sem trincas ou fissuras.

No processo FZ destacam-se as vantagens: maior índice de purificação do material, maior produção por unidade de tempo e elevado índice de eficiência de células fotovoltaicas manufaturadas com esse material. A desvantagem do método reside no fato desse necessitar de lingotes de forma cilíndrica uniforme, sem trincas ou fissuras.

8 | SILÍCIO POLICRISTALINO

8.1 | Processo de Solidificação Direcional Controlada

Esse processo é utilizado como rota alternativa para purificação de silício, no qual, o silício é fundido em um cadinho de quartzo ou grafite de alta densidade, equipado com bobinas de indução eletromagnética. A solidificação é feita lentamente em um cadinho de crescimento (GHENSEV, 2006). Na Figura 20, consta uma ilustração esquemática do processo de solidificação direcional.

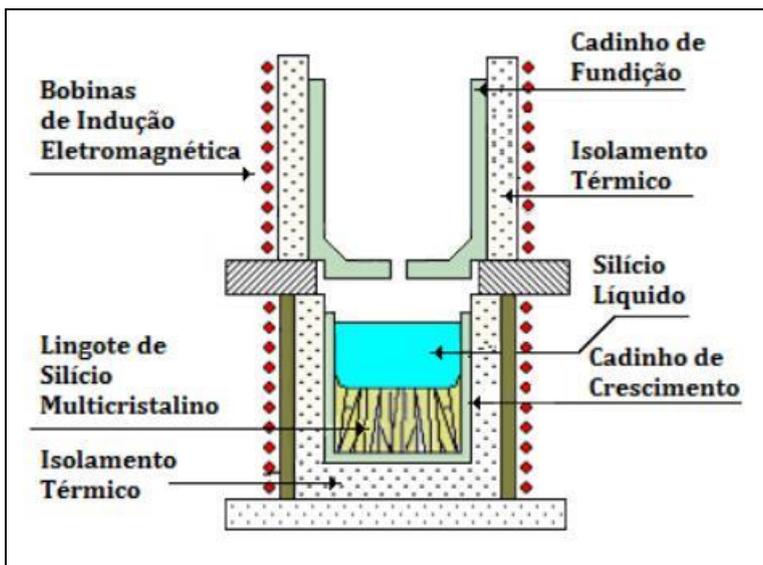


Figura 20. Ilustração esquemática do processo de solidificação direcional (GHENSEV, 2006).

A segregação das impurezas, etapa de purificação, está relacionada ao coeficiente de segregação do soluto (K), semelhante ao processo de FZ, conforme expresso na Equação 17, apresentada anteriormente (OLIVEIRA, 2008).

Durante a solidificação sucedem-se macrossegregações de impurezas nas extremidades do lingote, dependendo do coeficiente de segregação do soluto (K), cuja remoção ocorre mediante corte dessas extremidades; por conseguinte, há perda de silício.

Em regiões próximas à base do cadinho são formados grãos pequenos e crescem à medida que se aproxima da região mediana do lingote. Nestas regiões estão os grãos maiores e melhores alinhados na direção vertical. Na base do lingote, o resfriamento é mais rápido, ou seja, a taxa de resfriamento é maior, como consequência, há formação de uma estrutura com grãos pequenos. Na região mediana surgem os grãos colunares, cada vez maiores conforme se distancia da base (MOYSÉS, 2011).

Lingotes multicristalinos, tão grandes quanto 690x690 mm de seção transversal e peso de até 240 kg, são cultivados em intervalos de 56 h e taxa de produção de 4,3 kg/h. O aquecimento pode ser por indução ou por resistência e o consumo de energia para a solidificação direcional situa-se na faixa entre 8 e 15 kWh/kg. Ao contrário do crescimento CZ, a interface sólido/líquido é submersa na solidificação, precipita ou escorifica na superfície do banho e não causa obstáculo ao crescimento. A solidificação direcional é um processo mais simples, exige menos habilidade, mão de obra, equipamentos e sofisticação, comparado ao processo CZ, podendo se tornar um processo de baixo custo. Células fotovoltaicas feitas com

esse material possuem uma eficiência da ordem de 13 a 14% (GHENSEV, 2006). Pode-se inferir que a eficiência da célula está ligada às impurezas do lingote, portanto, o processo carece de avanços tecnológicos, isto é, uma oportunidade de estudo e, dentre outras, destacam as relacionadas a seguir:

- há que se produzir cristais com estrutura cristalina modificada para eliminar os defeitos, como os contornos de grãos e discordâncias;
- o conteúdo de impureza, superior àqueles obtidos por outros processos, obriga os descartes das extremidades dos lingotes, causando uma perda significativa do material;
- produzir um lingote com menor custo, sem perda na eficiência da célula fotovoltaica advinda desse lingote. Hoje, a eficiência dessas células situa-se acima de 15%, entretanto ainda está abaixo daquelas produzidas com silício CZ.

9 | OBTENÇÃO DE SILÍCIO EM FILMES (FITAS)

Esse processo é mais uma alternativa para reduzir os custos de produção das células fotovoltaicas por meio da utilização de técnicas de cristalização do silício em folha, fita ou filmes finos, removendo estágios de corte dos lingotes ou blocos em lâminas, além de evitar o desperdício de matéria-prima. É possível utilizar entre 6 e 8 g de silício por watts.

Essas técnicas se resumem ao crescimento de folhas ou fitas de silício policristalino fundido, posteriormente, cristalizado na forma planejada e também se pode utilizar gases precursores de silício ou pó/grãos de silício como matéria-prima.

9.1 | Processo CDS (*Crystallization on Dipped Substrate*)

Neste processo, uma placa de substrato é mergulhada em um cadinho com silício fundido que cristaliza de maneira uniforme, devido à remoção do calor latente. O substrato é puxado para fora do silício fundido, o silício multicristalino é separado do substrato e cortado por laser até o tamanho desejado (YAMATSUGU, 2008).

Nas ilustrações da Figura 21, em A, pode-se visualizar as etapas do processo CDS e em B, uma ilustração da fita de silício obtida por este processo.

Por meio desta técnica especial, torna-se possível produzir folhas de silício com dimensões de 156x156 mm e, ainda, com custos competitivos. A eficiência das placas fotovoltaicas, produzidas com esse tipo de silício, situa-se em torno de 14%. Acredita-se que este fato esteja relacionado à qualidade do silício obtido por meio da técnica CDS (YAMATSUGU, 2008).

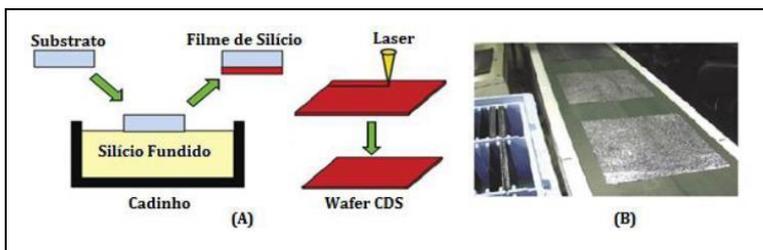


Figura 21. Processo CDS, em A, diagrama ilustrativo do processo CDS e, em B, uma ilustração da fita de silício obtida por esta técnica (YAMATSUGU, 2008).

9.2 | Processo RGS (*Ribbon Growth on Substrate*)

Nesse processo, o silício fundido é depositado sobre um substrato de grafite a alta velocidade (aproximadamente 10 cm/s) em um molde, como ilustrado na Figura 22. O silício se cristaliza em uma direção perpendicular àquela do movimento dos substratos. A interface sólido/líquido é extensa, permite elevada velocidade de resfriamento e, depois de solidificação. A fita ou placa de silício cristalizada desprende-se do substrato devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica. O substrato pode ser reutilizado posteriormente (SILVA, 2009).

Essa técnica proporciona a existência de uma interface sólido/líquido com largura independente da espessura da fita, eliminando a limitação da sua largura. Outro fator importante é o menor gradiente térmico na interface, que reduz as tensões internas induzidas e propicia taxas de crescimento superiores, quando comparado com as técnicas de crescimento vertical. Mesmo assim, a eficiência dessas células é de 14% em laboratório (PINTO, 2008). No diagrama da Figura 22 estão ilustradas, de forma esquemática, as etapas do processo RGS.

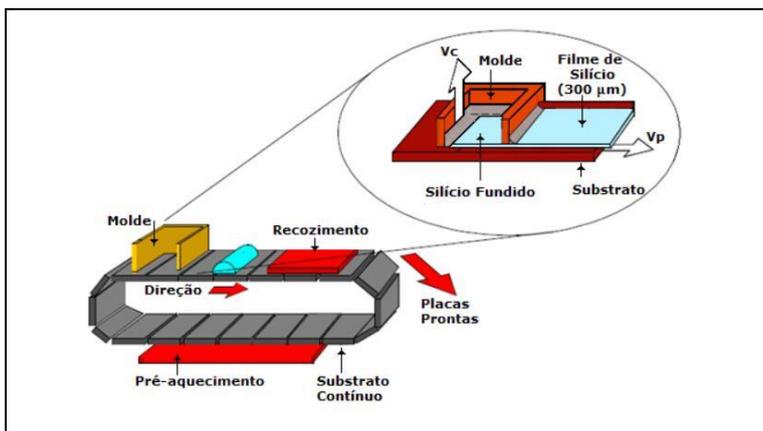


Figura 22. Diagrama ilustrativo do processo RGS (SCHÖNECKER, 2002).

9.3 | Processo SSP (*Silicon Sheet from Powder*)

O processo SSP baseia-se na compactação de grânulos de silício sobre um substrato e fusão destes em outro substrato não reutilizável. Ao aquecer a camada superior dos grânulos de silício, esta se funde e espalha-se sobre as camadas inferiores, formando uma pré-fita autossustentável. Após a formação dessa fita, realiza-se um tratamento de recristalização para aumentar o tamanho do grão. O processo resulta em folhas de silício multicristalino, com espessura de aproximadamente 400 µm e tamanho de grão da ordem de vários centímetros de comprimento e alguns milímetros de largura. As células solares produzidas em escala de laboratório sobre este material possuem uma eficiência de 13%. Na Figura 23, ilustra-se, de forma esquemática, as etapas do processo (PINTO, 2008).

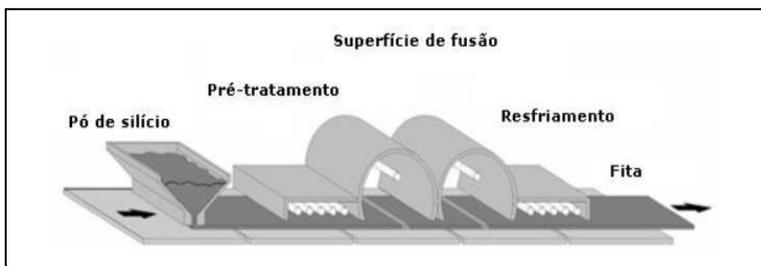


Figura 23. Esquema ilustrativo do processo SSP (PINTO, 2008).

9.4 | Processo EFG (*Edge Defined Film Fed Growth*)

Neste processo, o silício, fundido por aquecimento eletromagnético, sobe por capilaridade em um molde com uma pequena abertura, solidifica-se e é puxado continuamente a uma taxa de 15 a 20 mm/min (GHENSEV, 2006) como ilustrado na Figura 24.

O molde feito de grafite pode introduzir impurezas além de sofrer dissolução, provocando aumento na espessura e largura da fita. Quando o crescimento é feito em tubos octagonais com 10 cm de face e depois são cortadas com laser para produzir lâminas de silício, minimizam-se as impurezas existentes nas extremidades (SILVA, 2009).

As lâminas multicristalinas caracterizam-se por uma qualidade cristalográfica ligeiramente inferior à do silício multicristalino por solidificação direcional, com grãos colunares na direção de crescimento e alguma ondulação da superfície. Essas células possuem uma eficiência de 18,2%, para ensaios em laboratório (PINTO, 2008).

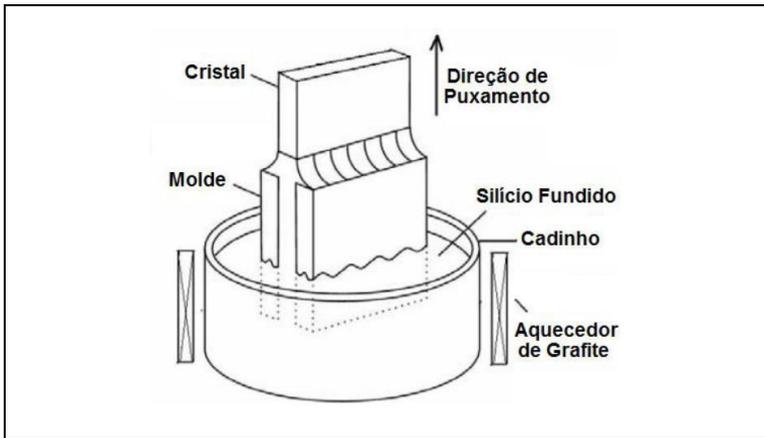


Figura 24. Ilustração esquemática do processo EFG. (SETH et al, 2010).

9.5 | Processo SR (*String Ribbon*)

Por meio dessa técnica, dois fios são puxados verticalmente de um silício fundido, e este se solidifica entre os dois fios por tensão superficial. Os fios são de materiais não condutores, como carbono ou quartzo, e servem para estabilizar as bordas além de resistir a altas temperaturas.

Nesta técnica, o controle de temperatura é menos crítico do que na técnica EFG, variações de 10K são toleradas, assim, permite-se a utilização de fornos mais simples e menos caros (SILVA, 2009).

As fitas, com espessura de 200 a 300 μm , são cortadas para processamento posterior, sem interromper o crescimento, pois o processo é contínuo, conforme ilustração esquemática da Figura 25 (ENF, 2011).

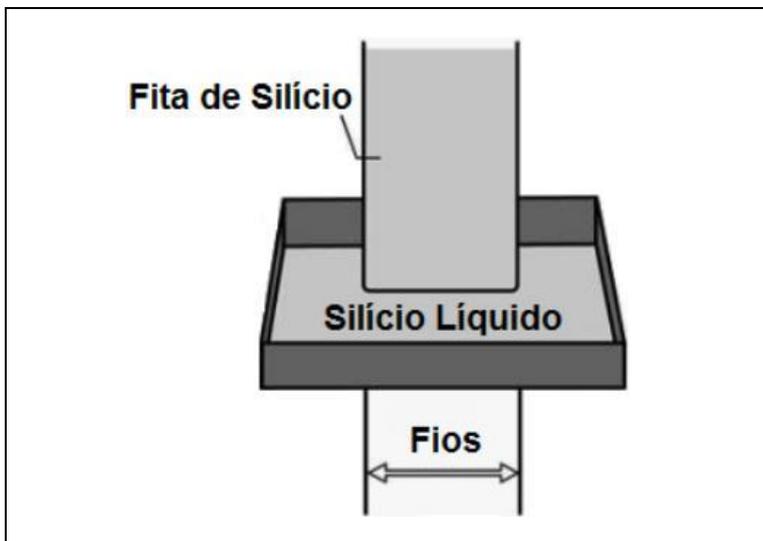


Figura 25. Ilustração esquemática do processo SR. (SILVA, 2009).

10 | SILÍCIO AMORFO

Silício amorfo é uma forma alotrópica de silício, na qual não há orientação cristalográfica. A tecnologia de produção do silício amorfo propicia algumas vantagens:

- é relativamente simples e os custos são competitivos;
- o silício amorfo absorve mais energia do que o silício cristalino, isso em função da espessura do filme;
- menos material é utilizado para produção de silício amorfo; pode ser depositado em uma grande variedade de substratos;
- possibilidade de fabricação de células solares com grandes áreas;
- baixo consumo de energia na produção.

Ainda ocorre a facilidade dos átomos de diferentes tamanhos e números de coordenação se incorporem à rede. Numa rede cristalina, a incorporação de átomos diferentes torna-se difícil, devido à forma rígida como os átomos estão organizados.

O silício amorfo pode ser produzido pelo processo PECVD (*plasma-enhanced chemical vapor deposition*).

Uma mistura gasosa de silano e hidrogênio é introduzida pela lateral do equipamento em um compartimento à vácuo. Uma descarga elétrica é aplicada e assim o plasma é formado, que é excitado e provoca a decomposição do gás, gerando radicais

livres e íons. Assim, o filme fino de silício amorfo é depositado sob o substrato que fica acima dos eletrodos; normalmente esse substrato é o vidro, por ser um material relativamente barato (Figura 26).

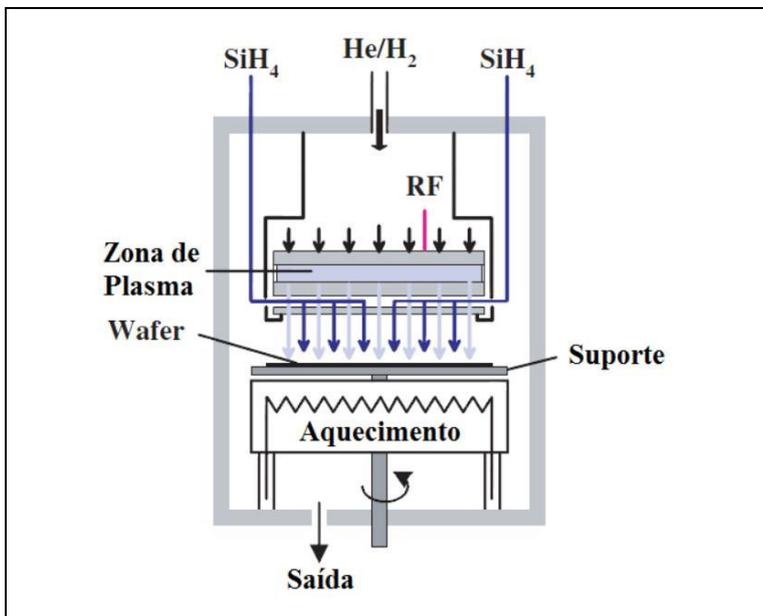


Figura 26. Esquema de produção de silício amorfo por RF (Radio Frequency) PECVD (MORAVEJ et al., 2003).

11 | PESQUISAS NA ÁREA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Há, no Brasil, condições que propiciam a exploração da energia solar, o que proporciona o uso pleno da energia fotovoltaica. No entanto, a energia solar ainda contribui de forma pouca expressiva no contexto da matriz energética brasileira. A exemplo, em 2018, o Brasil atingiu marca de 1306 MW de potência instalada em sistemas de energia solar fotovoltaica, o que corresponde a 0,8% da potência instalada total da matriz elétrica brasileira (SAUAIA, 2018; ANEEL/ABSolar, 2018).

A importância deste tema pode ser avaliada pelos diversos trabalhos técnicos e científicos realizados que buscaram o aperfeiçoamento e desenvolvimento das células fotovoltaicas para a geração de energia elétrica. Estes estudos têm sido desenvolvidos em diversos programas de pós-graduação, como em engenharia, física e química. Estas pesquisas são feitas nas principais universidades brasileiras, principalmente as públicas, como a Universidade de São Paulo (USP), a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), a Universidade Estadual Paulista (UNESP), a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), a Universidade Estadual de Minas Gerais (UEMG), o Instituto Militar de Engenharia (IME), a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), a Universidade de Brasília (UnB), a Universidade Federal do Tocantins (UNT), a Universidade Federal do Paraná (UFPR), a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), a Universidade Federal do Ceará (UFC), a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR), além da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), esta com um avançado centro de pesquisa e desenvolvimento nesta área, com um elevado número de teses e premiações.

Pesquisadores do Nucleo de Tecnologia em Energia Solar, da PUCRS, em parceria com a Eletrosul, produziram, recentemente, a célula solar com maior eficiência no Brasil, de 17,3%, com um processo de fácil adaptação à indústria de células solares (ZANESCO et al., 2018).

Também podem ser contabilizados os trabalhos realizados nos centro de pesquisa, como no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) e no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que trabalha com refino de silício grau metalúrgico desde o final da década de 1980, e o CETEC – Centro de Tecnologia de Minas Gerais.

Um panorama nos temas de teses e dissertações no período de 2005 a 2018 inserindo energia solar fotovoltaica, foi possível verificar que grande parte desses estudos abordavam o aperfeiçoamento do processo de produção de células solares em substrato de silício obtido pelo processo Czochralski, muito puro e importado. Esses estudos possuem geralmente como principais objetivos, a diminuição de custos e o aumento de rendimento de conversão de energia das células solares.

Os estudos englobaram dopagem das lâminas de silício com diferentes íons e concentrações, otimização do processo *gettering*, alterações nos fornos e no tempo de dopagem, avaliação do efeito de impurezas e desenvolvimento de filmes antirreflexo. Há, ainda, estudos direcionados ao aperfeiçoamento de processos para fabricação de células fotovoltaicas bifaciais.

Outros temas abordaram a melhoria técnica e econômica dos componentes do módulo fotovoltaico, como baterias e inversores, e abrangem a otimização de fator de dimensionamento dos módulos, sua montagem e cálculos de desempenho energético e de perdas. Além disso, há estudos sobre os aspectos técnicos, econômicos, inclusive a viabilidade, na aplicação de sistemas fotovoltaicos no bombeamento de água ou como fonte única de energia (ou em conjunto com a eólica, por exemplo) em regiões com escassez de energia elétrica, além da elaboração de mapas complementares do potencial solar em diversas regiões do país.

Cabe ainda ressaltar que, pesquisadores da UNICAMP, assim como do IPT, desenvolvem estudos de purificação de SiGM produzido nacionalmente, de forma a obter um silício com especificações para uso como SiGS, com 99,999% de pureza. As lâminas de silício preparadas pela combinação do processo VD (*Vacuum Degassing*) e CZ (*Czochralski*) mostraram potencial de atingir eficiência de conversão de energia solar para energia elétrica, nos níveis requeridos para produção comercial (CORTES et al., 2013). O uso de processos pirometalúrgicos permitiu elevar a pureza do material de 99,5% para valores acima de 99,999% (FERREIRA NETO et al., 2015).

Não foram encontrados estudos sobre a qualificação do quartzo para a produção de células solares. Deve-se salientar que, para o Brasil se apropriar da tecnologia de produção do silício grau solar, terá como grande desafio desenvolver o controle de impurezas não metálicas, que não podem ser removidas por técnicas convencionais, a obtenção de lingotes multicristalinos com estrutura adequada e a caracterização do material purificado, obtido por meio de caracterização física.

É visto que, embora as condições naturais sejam favoráveis, o alto custo dos painéis fotovoltaicos encarece a instalação em escala comercial solar no país, que pode custar até cerca de 95% mais que uma usina térmica de mesma potência. A pesquisa, nesta área, ainda principia no Brasil, assim como o processo de produção dos painéis fotovoltaicos. Os investimentos para o desenvolvimento desta área ocorrem nas entidades governamentais e em menor intensidade no setor privado, porém mesmo com o recente aumento de financiamento à pesquisa científica nacional, os valores destinados a esta área ainda continuam irrisórios para colocar o país numa posição de destaque como usuário da energia fotovoltaica.

Em 2011, a Eletrobrás iniciou uma chamada pública para desenvolver parcerias com o meio acadêmico e científico para pesquisar e purificar silício para uso como SiGS e fabricação de células fotovoltaicas com a finalidade de acelerar a expansão do uso da energia elétrica fotovoltaica no país. Hoje, o Brasil é o segundo maior exportador mundial de quartzo e de silício grau metalúrgico (MINASLIGAS, Pirapora-MG), mas ainda não desenvolveu uma indústria própria de transformação, para o SiGS. O SiGM produzido é vendido por aproximadamente US\$ 2,0/kg para empresas em diferentes

países que, após processamento, é importado pelo Brasil a um preço de U\$ 60,00/kg, na forma de polisilicone (base dos painéis fotovoltaicos). O consumo de silício na indústria de células solares fotovoltaicas em 2009 foi superior a 100.000 t, e as perspectivas de crescimento do consumo do silício de grau solar indicam um consumo superior a 200.000 t em 2020, o que irá corresponder a um mercado de aproximadamente US\$ 5 bilhões, mesmo considerando taxas de crescimento mais modestas que as atuais (27% ao ano).

Para reverter este quadro, deve-se formular e implementar uma política de incentivo à inovação tecnológica e a participação industrial do país no mercado de SiGS, pois somente uma política pública continuada será possível alcançar níveis satisfatórios da expansão dos sistemas fotovoltaicos. Além disso, as ações deverão ser acompanhadas de investimentos programados e metas físicas integradas ao planejamento do setor elétrico e conseqüentemente à política energética nacional, como mencionado em um estudo publicado pelo BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) sobre o setor (CARVALHO et al., 2014). Desta forma, poderá ser estabelecida uma indústria produtora de SiGS, o que acarretará em condições para projetos de implantação e expansão de indústrias fabricantes de SiGS e células e painéis solares fotovoltaicos no Brasil.

Entretanto, o Brasil participa apenas nas extremidades da cadeia produtiva, por ser detentor de grandes reservas mundiais de quartzos e ter processos industriais de transformação em silício metalúrgico, além da montagem das placas. Tem-se carência de tecnologia para a montagem e

instalação dos sistemas fotovoltaicos, afetando a implantação da energia solar fotovoltaica em maior escala (DAVIES et al., 2018).

Finalmente, em 2018, a cadeia produtiva de silício grau solar foi contemplada no Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Minerais Estratégicos, do Governo Federal (MCTIC, 2018). Considera-se que o principal desafio tecnológico para o desenvolvimento integral da cadeia produtiva de silício no País é o desenvolvimento e domínio de tecnologias e inovações que permitam a identificação de reservas de minerais de silício no País e a produção de concentrados, compostos e metais de silício, com especificações técnicas (especialmente de pureza) para atender às indústrias química e de produção de energia solar. Pretende-se, assim, atingir a produção de insumos de alto valor agregado, para serem utilizados em produtos de alta tecnologia, que propiciem a implantação e o desenvolvimento integral da cadeia produtiva de silício no Brasil.

12 | COMENTÁRIOS ADICIONAIS

Vários eventos impulsionaram o uso da energia fotovoltaica no mundo, dentre outros, destacam: a corrida espacial, a crise do petróleo na década 1970, os movimentos ambientalistas em prol do uso de energia limpa. Mais recente, o terremoto no Japão que impulsionou mais ainda a substituição da energia nuclear por energia limpa, em especial a fotovoltaica. Diante desse panorama, pode-se afirmar que há muitas razões para o crescimento da oferta da energia fotovoltaica em todo o mundo.

No Brasil, não há uma política pública, pelo menos um esboço, para impulsionar a pesquisa na área da energia fotovoltaica. As ações levadas a efeito, até hoje, foram resultados dos trabalhos acadêmicos desenvolvidos por pesquisadores nos cursos de pós-graduação. Neste panorama, essas ações se dispersam ao sabor das ideias individuais de cada pesquisador ou grupo de pesquisa. Na ausência de uma diretriz nacional de pesquisa nessa área, surgem, naturalmente, os gestores *ad hoc* em todo o universo acadêmico do País. Ainda mais grave, a ausência total de uma política séria de planejamento e investimento nessa área, inibe-se por completo, tanto a pesquisa quanto o empreendedorismo, hoje sem rumo. Em linhas gerais, falta planejamento, com princípio meio e fim, para se alinhar as ações de pesquisa nessa área.

O processo de solidificação direcional controlada possui eficiências típicas de grandes células de produção e situam-se entre 13 e 14%, com boa consistência. A perda em eficiência pela existência de um elevado número de orientações cristalinas pode ser compensada pelo menor custo de produção, este, em termos de potência (Watt), é semelhante ao

processo CZ. Entretanto, tal argumento não é sustentável em contraposição aos avanços em cursos de outros processos com eficiências mais elevadas.

Os teores das impurezas, fósforo e boro no SiGM, registrados na literatura situam-se nas faixas de 20 a 50 e 40 a 60 ppm, respectivamente. Entretanto, os valores levados a efeito na prática são da ordem de poucos ppm, isto é, abaixo de 5%. Tais informações são, raramente, publicadas, tão pouco os métodos usados na obtenção deste SiGM melhorado.

13 | GLOSSÁRIO

Banda de valência - É uma banda de energia formada por níveis de energia, ocupada por elétrons semilivres, que estão um pouco mais separados do núcleo que os demais. É nesta banda de energia que se acumulam as lacunas eletrônicas ou buracos eletrônicos, após serem criadas no material por processos energéticos, como por exemplo, a incidência de radiação eletromagnética ou radiação solar. É nela também que se dá o transporte de lacunas (buracos) sob a influência de campo elétrico aplicado. Esta banda tem energias menores que a banda de condução, onde se dá o transporte dos elétrons.

Célula fotovoltaica – Em energia solar, é a unidade básica usada na conversão de energia solar em energia elétrica e funciona como geradora de energia elétrica com base na energia contida na radiação solar.

Dopagem eletrônica ou dopagem - na eletrônica de semicondutores, é a adição de impurezas químicas elementares, como fósforo e boro ao silício puro com o propósito de dotar o silício de propriedades de condução controlada específica. Este procedimento deve ser orientado e bem definido para favorecer à diferença de potencial entre as extremidades do semicondutor. Se este não é puro, a dopagem não atinge o seu propósito, em virtude do arranjo desordenado de cargas decorrentes das impurezas já existentes no silício, ou seja, no semicondutor.

Efeito fotovoltaico – é a diferença de potencial entre as extremidades de um semicondutor resultante da absorção da radiação solar (luz) sobre uma placa fotovoltaica.

Energia fotovoltaica – é a energia obtida pela conversão direta da luz solar em eletricidade, por meio de efeito fotovoltaico, que converte a energia oriunda dos fótons das radiações solares em energia elétrica.

Fotovoltaico – que desenvolve força eletromotriz pela ação da luz.

Gap de energia - Nos materiais semicondutores à temperatura de zero Kelvin, os elétrons encontram-se na banda de valência. Nesta situação, o semicondutor comporta-se como um isolante, isto é, não conduz eletricidade. À medida que sua temperatura aumenta, os elétrons absorvem energia passando para a banda de condução. A energia necessária para promover a transição do elétron de uma banda a outra é chamada de gap de energia (em inglês band gap), ou banda proibida. Nas temperaturas baixas, todos os semicondutores são isolantes e na temperatura correspondente ao zero absoluto (zero Kelvin ou -273°C) todos os elétrons do semicondutor estão presos na camada de valência. À medida que a temperatura do semicondutor aumenta, o número de elétrons que passam para a banda de condução aumenta, passando a um semicondutor e a conduzir mais eletricidade, caso seja exposto a uma diferença de potencial.

Junção pn – quando se introduz boro na metade de uma placa de silício puro e na outra metade fósforo, o produto resultante chama-se junção pn.

Painel fotovoltaico - são dispositivos utilizados para converter a energia da luz do Sol em energia elétrica. Os painéis solares fotovoltaicos são compostos por várias células fotovoltaicas ou solares, assim designadas, porque em geral, captam a luz do Sol.

Piezeletricidade - Conjunto de fenômenos elétricos produzidos por pressões ou deformações exercidas sobre certos corpos.

— Certos minerais não metálicos, como o quartzo, a turmalina e alguns outros cristais, têm propriedades elétricas especiais. Em 1880, Pierre e Jacques Curie, dois cientistas franceses, descobriram que alguns cristais desenvolvem uma carga elétrica sobre a superfície, quando submetidos a uma pressão ou a uma tração ao longo de um eixo.

Semicondutor – são materiais sólidos que possuem condutividade elétrica entre os condutores e isolantes, exemplo o silício. Esses materiais comportam-se como isolantes a baixas temperaturas e como condutores a temperaturas elevadas. Se a temperatura (agitação térmica) aumenta, alguns elétrons periféricos (camada de valência) são arrancados e a resistividade diminui. Esta também pode ser reduzida: pelo efeito da luz ou radiação solar; por ação de um campo elétrico ou magnético; pela existência de átomos de natureza diferente (impurezas), disseminados no cristal. Os elétrons de valência dos átomos estranhos podem apresentar-se, de acordo com tipo de impureza, em maior ou menor número do que os elétrons periféricos do material puro. No primeiro caso, os elétrons em excesso podem permitir a passagem de uma corrente elétrica e o semicondutor torna-se doador tipo n. No segundo caso, a falta de elétrons (lacunas ou buracos) permite também a passagem de um fluxo de elétrons que ocupa os lugares vazios e o semicondutor torna-se acceptor de elétrons, tipo p.

SiGM – Silício grau metalúrgico, também conhecido como metálico, possui um teor de Si entre 98,70 e 99,50%, isto é, um SiGM de qualidade. A sua obtenção se dá pela redução

carbotérmica do quartzo por agentes redutores, em fornos a arco elétrico, para produção em larga escala. O SiGM é a matéria-prima utilizada para produzir o silício solar.

SiGS – Silício grau solar é um produto resultante do tratamento do SiGM por meio de processos de purificação para se obter um produto final com pureza entre 99,99 e 99,9999%, exigida para uso na confecção de células fotovoltaica.

Silano - é um composto químico cuja fórmula é SiH_4 . É análogo ao metano (CH_4), porém derivado do silício. Se presume que à temperatura ambiente, o silano é um gás pirofórico – entra em combustão espontaneamente em presença do ar, sem necessidade de uma fonte de ignição. Entretanto, há quem acredite que o silano é estável e que a formação natural de silanos maiores durante a sua produção é a causa da sua piroforicidade. Acima dos 420°C , o silano se decompõe em silício e hidrogênio, portanto pode ser empregado na deposição química de vapor de silício.

De forma mais geral, um silano é qualquer análogo dos alcanos, porém derivados do silício. Os silanos consistem numa cadeia de átomos de silício unidos covalentemente a átomos de hidrogênio. A fórmula geral de um silano é $\text{Si}_n\text{H}_{(2n+2)}$. Os silanos tendem a ser menos estáveis que seus análogos de carbono, pois a ligação Si-Si é de menor energia que a ligação C-C. O oxigênio decompõe os silanos porque a ligação Si-O é muito estável.

Wafer – Na microeletrônica, consiste numa fina pastilha ou lâmina de silício puro, na qual microcircuitos são construídos pela dopagem com fósforo e boro. Os wafers são importantes na confecção de painéis fotovoltaicos. Fabricados em vários tamanhos, desde 25,4 até 300 mm e espessura da ordem de

0,5 mm. Geralmente, são provenientes do corte de uma barra de silício puro, usando-se para o corte uma serra de diamante ou um fio desse mesmo material e então, polido em uma ou nas duas faces.

Zona de depleção – em um material semiconductor, medição da densidade de portadores de carga abaixo do seu nível e do nível de dopagem em uma temperatura específica

14 | AGRADECIMENTOS

Com as adversidades, enxergamos a nós mesmos, um aprendizado que nos atingiu e que nunca clamamos por ele. Ao longo deste trabalho, sempre mantivemos a liberdade de criar, de produzir e nunca minimizamos o conhecimento, por último, nunca resignamos diante das adversidades. Assim, somos gratos pelos ensinamentos advindos do antagonismo, o qual, mesmo sem querer, nos mostrou o caminho da produtividade. Por fim, muito nos alegrou fazer da adversidade uma circunstância oportuna, favorável à realização deste trabalho.

O segredo para se fazer um bom trabalho é a motivação, associada à perspectiva de crescimento. Mesmo com a falta de recurso para realização total deste trabalho, não faltou ao grupo a motivação, a perseverança e o empenho de todos. Assim, foram somados esforços pequenos, tanto de interesse próprio como do grupo, além de bem planejados, pois sempre acreditamos que é possível ser inteligente sozinho, entretanto realizar um trabalho sozinho é por demais penoso. Por essas e outras razões, como coordenador, sou grato pelo esforço conjunto e espontâneo de todos os componentes deste grupo.

Ao CNPq, os nossos reconhecimentos pelos recursos com a concessão de bolsas, votos de confiança e apoio ao longo da realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-MOHAMAD, A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system. *Applied Energy* 79 (2004) 345-354.

AL-MOHAMAD, A. Global, direct and diffuse solar-radiation in Syria. *Applied Energy* 79(2) (2004) 191-200.

ANDRADE, Adnei M. de. A. Tecnologia do Silício, Silício Grau Eletrônico. Escola Politécnica. USP. Disponível em: <<http://www.lme.usp.br/~fonseca/silicio1.htm>>. Acesso 01 jul. 2011.

BARBOSA, Marília Inês Mendes. Caracterização Tecnológica de Lascas de Quartzo. CNPq/CETEM, 1995. 45p. - (Série Tecnologia Mineral, 69).

BERTOLINO, L.C., Santos, W.H., Santos, A.C. Caracterização mineralógica de minérios. In. Luz, A.B., França, S.C.A., Braga, P.F.A. Tratamento de Minérios, 6ª Ed., 69-104, CETEM/MCTIC, Rio de Janeiro, 2018.

BARRON, Andrew R. Semiconductor Grade Silicon. Connexions. Disponível em <<http://cnx.org/content/m31994/latest/>>. Acesso 14 jul. 2011.

BRAGA, Renata Pereira. Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.

CARVALHO, P.S.L., Mesquita, P.P.D., Rocio, M.A.R. A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira? BNDES Setorial 40, Metalurgia, 205-234, 2014.

CHO, H.J.; Lee, Bo-Y.; and Lee, J.Y. The effects of several growth parameters on the formation behavior of point defects in Czochralski-grown silicon crystals. *Journal of Crystal Growth* 292 (2006) 260-265. Available on line at www.sciencedirect.com.

CÔRTEZ, A.D.S.; Silva, D.S.; Viana, G.A.; Mota, E.F.; Zampier, P.R.; Mei, P, R. Solar cells from upgraded metallurgical grade silicon purified by metallurgical routes. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 5, 023129, 2013.

CRESEB, CEPEL. Energia Solar: Princípios e Aplicações. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar.pdf>.

DAVIES, F.S., Frisso, G.L., Brandão, M.V. A utilização do silício nacional para a fabricação de placas solares: uma reflexão das dificuldades tecnológica e financeira. In: Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado-RS, Disponível em <http://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/491/491>. Acesso 08 fev. 2019.

ERGÜL, E. Reduction of silicon dioxide by electrochemical deoxidation. Master of Science, Middle East Technical University, 67p., Turkey, 2010.

ENF. A review of all current and future PV Technologies, written by ENF's CTO and reviewed by experts from the European Commission, Evergreen Solar and Phönix SonnenStrom. Disponível em: <<http://www.enf.cn/reports/analysis2.html>>. Acesso 03 de jul. 2011.

ERIK Enebakk et al. Silicon Feedstock For Solar Cells. US PAT 20070128099A1. 2007. Disponível em : <<http://www.google.com/patents/about?id=UFGiAAAAEBAJ&dq=us+pat+20070128099a1>>.

FERREIRA NETO, J.B., Ribeiro, T.R., Lima, M.L. et al. Obtenção de silício grau solar por rota metalúrgica. Revista Brasileira de Energia Solar, Ano 6, vol. VI, n. 1, 37-46, 2015.

GHENSEV, A. Materiais e Processos de Fabricação de Células Fotovoltaicas. Departamento de Engenharia, UFLA - Universidade Federal de Lavras, Lavras de Minas, MG 2006. <http://www.solenerg.com.br/files/monografia_almir.pdf>.

GOETZBERGER, A.; Hebliing, C. and Schock, H.W. Photovoltaic materials, history, status and outlook. Minerals Science and engineering, R 40 (2003) 1-46.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Disponível em: <http://www.ipt.br/projetos/5.htm>. Acesso 30 agos. 2011).

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Rota Metalúrgica. Disponível em: <<http://www.nipeunicamp.org.br/inovafv/admin/resources/uploa ds/jo%C3%A3obatistaferreiraneto.pdf>>.

JANNUZZI, G.M et al. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação. International Energy Initiative para a América Latina (IEI-LA) e Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). 2009.

MAGALDI, I.C. de S. Sistema Fotovoltaico como fonte de energia para cercas elétricas. Universidade Federal de Lavras. Curso de Pós-Graduação Latu Sensu. Lavras, MINAS GERAIS, 2009.

MCTIC - Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Plano de ciência, tecnologia e inovação para minerais estratégicos 2018-2022. Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação/MCTIC, Brasília, 48p., 2018.

MEDEIROS, N.A.C. Sistema de Observação e Análise para Parques Fotovoltaicos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. 2008.

MEIRELLES. Fabricação De Células Solares. Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2002/991446-relatoriofinal.pdf>. Acesso 30 mai. 2011.

MME - Ministério de Minas e Energia. Perfil do Quartzo. 2009.

MME - Ministério das Minas e Energia (2017) Energia solar no Brasil e no mundo - Ano de referência 2016. Disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17>, edição 16/10/2017. Acesso 15 dez. 2018.

MOEHLECKE, A., Campos, R.C., Zanesco, I. Células solares finas em silício tipo n: avaliação de diferentes pastas metálicas para contato elétrico da face dopada com boro. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 14, n. 3, 250-256, 2017.

MORAVEJ, M.; Babayan, S.E.; Nowling, G.R.; Yang, X.; Hicks, R.F. Plasma enhanced chemical vapour deposition of hydrogenated amorphous silicon at atmospheric pressure. Chemical Engineering Department, University of California, Los Angeles, CA 90095, USA. 2003.

MOREIRA, Simone de Paula. Purificação de silício metalúrgico por fusão zonal horizontal em forno de feixe de elétrons. (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

MORI, Vânia. Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais. CETEM/MCT, 2007:it. 42p. (Série Tecnologia Ambiental, 41).

MYRVAGNES, V. Analyses and Characterization of Fossil Carbonaceous Materials for Silicon reduction. Norwegian University of Science and Technology. Faculty of Natural Sciences and Technology. Department of Materials Science and Engineering. Trondheim, 2008.

NELSON, J. The Physical of Solar Cells. Imperial Collage Press. 363p. London, 2010.

PINTO, Cláudia Costa Rodrigues. Estudo de um Processo de Formação de Fitas de Silício por CVD para Aplicações Fotovoltaicas. (Doutorado). Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 2008.

QUEIROZ DA SILVA, A.M. Redução de Silício por Hidrometalurgia. Tese de D.Sc., Departamento de Engenharia Química, Universidade do Porto. Porto, Portugal, 1999.

NEUMANN, R., Schenider, C.L. Alcover Neto, A. Caracterização tecnológica de minérios, Parte II. In: Luz, A. B.; Sampaio, J.A. e França, S.C.A. (Eds). Tratamento de Minérios. 5ª Ed., 85-139, CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2010.

PROENÇA, F.P.H. Tecnologia para texturização hemisférica suave de células fotovoltaicas. Dissertação de Mestrado. Universidade de Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Belo Horizonte, 2007.

RANJAN, S.; Balaji, S.; Rocco A.; Panella, B and Erik Ydstie, B. Silicon solar cell production. Computers and Chemical Engineering 35 (2011) 1439–1453. Contents lists available at ScienceDirect. www.elsevier.com/locate/compchemeng.

RAZYKOV, T.M.; Ferekides, C.S.; Morel, D.; Stefanakos, E. and Ullal, H.S. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. Solar Energy 85 (2011), 1580-1608.

REC Group. REC'S Fluidized Bed Reactor (FBR) Process. Disponível em: <<http://www.recgroup.com/en/tech/FBR/>>. Acesso 01 julho de 2011.

RECAMÁN PAYO, M.J. Purificación de triclorosilano por destilación en el proceso de obtención de silício de grado solar. (Doutorado). Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, 2008.

RODRIGUES, Carlos Nunes. Centrais Solares Fotovoltaicas Ligadas a Redes Eléctricas. INET Disponível em: <[http://repositorio.ineg.pt/bitstream/10400.9/575/1/ProvasCARL OR%20RODRIGUESI_2009.pdf](http://repositorio.ineg.pt/bitstream/10400.9/575/1/ProvasCARL%20RODRIGUESI_2009.pdf)>

SANTOS, Robert Cristiam Rodrigues dos; Victorio, Danilo de Oliveira Duarte. Si-Grau Eletrônico. Escola de Engenharia de Lorena, USP, 2004.

SAUAIA, R.L. Energia solar fotovoltaica: panorama, oportunidades e desafios. 1^o Workshop de Energia Solar Fotovoltaica, Rio de Janeiro, 2018. www.ons.org.br/.../02-Setor-Dr.RodrigoLopesSuaia-Absolar.pdf Acesso 12 jan. 2019.

SCHEI, A., Tuset, J.K. and Tveit, H. "Production of high silicon alloys". Trondheim, Tapir, 1998.

SCHIMIDT, Douglas Nanes Schimidt; Rocha, Rafaela Lisboa Pereira da Rocha. Silício Grau Solar. Escola de Engenharia de Lorena, USP, 2010.

SCHÖNECKER et al. Ribbon-Growth-on-Substrate: Status, Challenges and Promises of High.

SERÓDIO, Leonardo Moutinho. Estado da Arte da Obtenção de Silício Grau Solar. Escola Politécnica, UFRJ, 2009.

SETH, Pooja; Aggarwal, S.; Sharma, A.C.; Rao, S.M.; Verma, R.C. Growth of lithium fluoride crystals by edge defined film fed growth technique. Department of Physics, Punjabi University, Patiala, 2009.

SILICONSULTANT. Multicrystalline Ingot Growth. Disponível em <<http://www.siliconsultant.com>>

SILVA, José Almeida. Dopagem de fitas de silício durante a cristalização a partir de uma zona fundida Dissertação de Doutorado. Departamento de Engenharia Geográfica Geofísica e Energia, 2009.

SMITH, C. and Barron, A.R. Synthesis and Purification of Bulk Semiconductors solar cells reduces wafer costs. 2008.

SWART, Jacobus. Materiais Elétricos. Disponível em: <<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/ie521/cap05.pdf>> Acessado em 20 de novembro de 2010. This work is produced by The Connexions Project and licensed under the Creative Commons Attribution License.

TONNESEN, Diego Araújo; Luz, A.B.; Sampaio, J.A. (2011). Visita Técnica à MINASLIGA. In: Relatório de Viagem a Pirapora/MG, realizada em junho de 2011. CETEM/MCT, Rio de Janeiro.

University of Konstanz, Faculty of Physics, P.O. Box 5560, 78434 Konstanz, Germany, 2002.

VITENSKAPSAKADEMI, N.T. The metallurgical route to Solar Silicon. Elkem Solar AS, 2007.

WikiEnergia. Disponível em <http://wikienergia.com/~edp/index.php?title=Silicio_cristalino>

WORLD ENERGY COUNCIL (2013) World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050., 284p. <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09>. Acesso 08 jan. 2019.

YAMATSU, H. et al. Crystallization on dipped substrate wafer technology for crystalline silicon solar cells reduces wafer costs. *Photovoltaics International*, v. 2, 2008.

ZANESCO, I., Crestani, T., Moehlecke, A. et al. (2018) Desenvolvimento da célula solar com maior eficiência no Brasil com processo industrial. In: *Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Gramado-RS, Disponível em <http://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/245/245>. Acesso em 10 jan. 2019.

Bibliografia Consultada

AKEED A. Pavel, A.A; Khan, M.R. and Islam N.E. On the possibility improving silicon solar cell efficiency through impurity photovoltaic effect and compensation. *Solid-State Electronics* 54 (2010) 1278-1283.

AL HANAI, T.; Hashim, R.B.; El Chaar, L. and Lamont, L.A. Environmental effects on a grid connected 900 W photovoltaic thin-film amorphous silicon system.

AZZOUZI, G. and Chegaar, M. Impurity photovoltaic effect in silicon solar cell doped with sulphur: A numerical simulation. *Physica B* 406 (2011) 1773-1777.

BIRD, L.A. and Cory, K.S. Renewable Energy Price-Stability Benefits in Utility Green Power Programs. NERL – National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP670-43532. August 2008.

CIFTJA, A.; Engh, T.A. and Tangstad, M. Refining and Recycling of Silicon: A Review.

CISZEK, T.F.; Wang, T.H.; Page, M.R. Bauer, R.E. and Landry, M.D. Solar-Grade Silicon from Metallurgical-Grade Silicon Via Iodine Chemical Vapor Transport Purification. National Renewable Energy Laboratory NREL/CP-520-31443. Presented at the 29th IEEE PV Specialists Conference. New Orleans, Louisiana, May 20-24, 2002.

CÔRTEZ, A.D.S. Desenvolvimento de células fotovoltaicas utilizando silício metalúrgico melhorado (Si-UMG). Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UNICAMP, 183p, 2011.

EL CHAAR, L.; lamont, L.A.;and El Zeinb, N. Review of photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 2165-2175.

GEERLIGS, L.J.; Manshanden, P.; Wyers G.P.; Øvrelid, E.J.; Raanes, O.S.; Waernes, A.N. and B. Wiersma Specification of solar grade silicon: how common impurities affect the cell efficiency of Mc-Si solar cells. Presented at the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, 6-10 June, 2005.

GUZZO, P.L. (2008). Quartzo. In: Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações, pg 681-721, Ed. Adão B. Luz e Fernando Lins, CETEM/MCT, 2008.

KUMAR, R. and Rosen, M.A. A critical review of photovoltaic– thermal solar collectors for air heating *Applied Energy* 88 (2011) 3603-3614.

MINAS LIGAS Silício metálico. <http://www.minasligas.com.br/produtos>
Acesso em 02 out. 2018.

LUZ, A.B. e Braz, E. Quartzo. Série Rochas e Minerais Industriais. CETEM. 2000.

PARIDA, B.; Iniyar, S. Goic, R. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1625-1636.

PAVAN, A.M.; Mellit, A and De Pieri, D. The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants. *Solar Energy* 85 (2011) 1128-1136.

PIÑA, J.; Bucal, V.; Schbib, S.N.; Ege, P. and Lasa., H.I. Simulation of a Silicon CVD Spouted Fluidized Bed Reactor: Semi-Batch Operations. 2007 ECI Conference on The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering. Vancouver, Canada, 2007.

PORTAL ENERGIA www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/. Acesso 11 jan. 2017.

RANNELS, E.J. The case for a 40% efficiency goal for photovoltaic cells in 2005. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 65, 3-8, 2001.

RODRIGUEZ, D.M.; Horley, P.P.; J.G. Hernandez, J.G.; Vorobiev, Y.V. and Gorley, P.N. Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures. *Solar Energy* 78 (2005) 243-250.

SANCHEZ REINOSO, C.R.; Milone, D.H. and Buitrago, R.H. Efficiency study of different photovoltaic plant connection schemes under dynamic shading. *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010) 5838-5843.

SAPA SOLAR, células fotovoltaicas (2017). <http://www.sapa-solar.com/portugal/sapa-solar/>. Acesso 11 jan. 2017.

SKOPLAKI, E. and Palyvos, J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy* 83 (2009) 614-624.

SKOPLAKI, E. and Palyvos, J.A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy* 34 (2009) 23-29.

SKOPLAKI, E.; Boudouvis, A.G. and Palyvos, J.A. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008) 1393-1402.

SUZUKI, C.K. e Pereira, J.T.V. Energia solar e produção de silício metálico baseado no programa QITS (Quartz Industrial Trade System).

TEO, H.G.; Lee, P.S. and Hawlader, M.N.A. An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, v. 90, 1, 309-315, 2011.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2018, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 340 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Rochas e Minerais Industriais

SRMI-25 – Alterações das rochas das fachadas da Igreja de Nossa Senhora da Candelária. Luanna Cavalcanti Rebecchi de Moura, Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Daniele Pereira da Silva Dalto, Amanda Guimarães dos Santos Mozer, Kátia Leite Mansur, 2018.

SRMI-24 – Caracterização tecnológica do Lioz da fachada do Real Gabinete Português de Leitura do Rio de Janeiro. Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Marcia Braga, Luanna Cavalcanti Rebecchi de Moura, 2018.

SRMI-23 – As opalas de Pedro II no Piauí e o arranjo produtivo local. Francisco Wilson Hollanda Vidal, Leonardo Catabriga Freire, Carlos Alberto Melo Santos, Marcelo Gonçalves Nunes de Oliveira Morais, 2018.

INFORMAÇÕES GERAIS

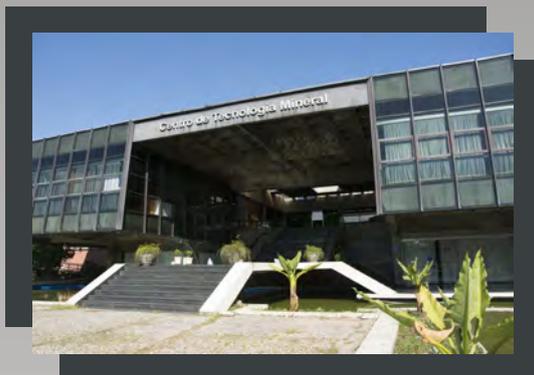
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Geral: (21) 3865-7222
Biblioteca: (21) 3865-7218
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 41 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.