



**CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS**

*Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 3.607, de 17/10/05, D.O.U. nº 202, de 20/10/2005*  
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

Carlos Henrique Xavier Araujo

ESTUDO SOBRE O APROVEITAMENTO DO QUARTZO DE CRISTALÂNDIA-TO  
NA INDÚSTRIA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Palmas –TO

2015

Carlos Henrique Xavier Araujo

ESTUDO SOBRE O APROVEITAMENTO DO QUARTZO DE CRISTALÂNDIA-TO  
NA INDÚSTRIA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Monografia apresentada como requisito parcial da  
disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
do curso de Engenharia de Minas, orientado pela  
Professora Dr. Angela Ruriko Sakamoto.

Palmas –TO

2015

Carlos Henrique Xavier Araujo

ESTUDO SOBRE O APROVEITAMENTO DO QUARTZO DE CRISTALÂNDIA-TO  
NA INDÚSTRIA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Monografia apresentada como requisito parcial da  
disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
do curso de Engenharia de Minas, orientado pela  
Professora Dr. Angela Ruriko Sakamoto.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2015

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Angela Ruriko Sakamoto  
Centro Universitário Luterano de Palmas

---

Professor M.Sc Daniel dos Santos Costa  
Centro Universitário Luterano de Palmas

---

Professor Esp. Valério Sousa Lima  
Centro Universitário Luterano de Palmas

Palmas –TO

2015

*O temor do SENHOR é o princípio da sabedoria, e a ciência do Santo, a prudência.*

*Provérbios 9.10*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por toda vitória que tem me proporcionado, porque ele é o princípio de tudo e sem ele não estaria aqui.

Aos meus pais Edmar Xavier Dourado e Emizalda Araujo Carvalho Dourado por sempre acreditarem na importância do estudo e pela força que sempre me deram nas horas difíceis.

A orientadora professora Dra. Angela Ruriko Sakamoto pela orientação e apoio na realização deste trabalho e principalmente pela paciência e sabedoria que demonstrou comigo, sendo fundamental para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos queridos que estão comigo desde o início da jornada.

## RESUMO

ARAUJO, Carlos Henrique Xavier. Desafios para a viabilização do aproveitamento do quartzo de Cristalândia-TO na indústria de células fotovoltaicas. 2015. 53 f. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Minas, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2015.

Atualmente um dos assuntos mais discutidos na comunidade é a procura de fontes energéticas eco-eficientes e de melhor relação custo benefício. Neste contexto destaca-se a energia solar fotovoltaica que é a conversão da luz do sol em elétrica, tem ganho destaque dada necessidade de diversificar a composição da matriz energética do país. O objetivo desta pesquisa consiste em levantar dados a respeito do processo de beneficiamento do quartzo de Cristalândia – TO e evidenciar a rota do quartzo, da extração até aspectos técnicos associados à sua purificação e aplicação em células fotovoltaicas.

Palavras-chave: Quartzo, Células Fotovoltaicas, Energia Solar, Tocantins.

## **ABSTRACT**

ARAUJO, Carlos Henrique Xavier. Challenges for the feasibility of quartz exploration by photovoltaic cell industries in Cristalândia-TO. 2015. 51 s. Sênior Research Project (Major in Mine Engineering). Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2015.

One of the most popular subjects nowadays is the search for eco-efficient energy sources with a better cost-benefit ratio. In this context we highlight that solar photovoltaic energy (the conversion of sunlight in electrical energy) has become popular due to the need for diversification in the composition of Brazilian energetic matrix. This research aims to collect data about the process of beneficiation of quartz extracted in Cristalândia-TO. It also evidences the rout of quartz, from the extraction to the technical aspects related to the purification and application on photovoltaic cells.

Key-words: Quartz, Photovoltaic Cells, Solar Energy, Tocantins.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principal e tradicionais regiões produtoras de cristal de rocha e lascas no Brasil. ....	3
Figura 2 - Quartzo Industrial de Dueré e Cristalândia .....	4
Figura 3 - Classificação visual das lascas de quartzo .....	9
Figura 4 - Célula de silício monocristalino (m-Si) .....	12
Figura 5 - Célula de Silício Policristalino (p-Si).....	13
Figura 6 - Célula de Filmes Finos.....	14
Figura 7 - Modelo de sistema fotovoltaico isolado.....	16
Figura 8 - Modelo de sistema fotovoltaico conectados à rede .....	16
Figura 9 - Etapas de purificação do silício por rota química .....	18
Figura 10 - Sequência de rota metalúrgica desenvolvida pela Elkem Solar.....	20
Figura 11 - Visualização da cidade de Cristalândia utilizando o Google Earth.....	24
Figura 12 - Extração de quartzo no garimpo Felipe .....	26
Figura 13 - Amostras selecionadas para análises (BE01 – 450 g; BE02 – 435 g; BE03 – 475 g) .....	28

## LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Protocolo de Pesquisa, conforme sugerido por Yin (2010). .....	22
---	----

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Caracterização do quartzo para teores de $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	29
--	----

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Exportação de bens primários e manufaturados em 2013 .....	6
Gráfico 2 - Geração de empregos no setor fotovoltaico .....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS	Espectrofotometria de Absorção Atômica
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
APL	Arranjos Produtivos Locais
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CEULP	Centro Universitário Luterano de Palmas
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CNPJ	Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica
COOPERCRISTAL	Cooperativa e Mineração dos Garimpeiros de Cristalândia
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEF	Fundo Global para o Meio Ambiente
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LO	Licença de operação
MME	Ministério de Minas e Energia
	Núcleo de Pesquisa para a Pequena Mineração
NAP	Responsável
NEI	Núcleo de Empreendedorismo e Inovação
OCB/TO	Organização das Cooperativas Brasileiras
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas
SEBRAE	Empresas
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TO	Tocantins
ULBRA	Universidade Luterana do Brasil

## LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
a-Si	Silício Amorfo
Ca	Cálcio
CdTe	Telureto de cádmio
CIGS	Disselenato de Cobre, índio e gálio
CIS	Disseleneto de cobre-índio
ClH	Clorídrico
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CZ	Czochralski
Fe	Ferro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
g	grama
K	Potássio
Li	Lítio
Ma	Milhões de anos
Mg	Magnésio
mm	Milímetros
Mn	Manganês
Mn	Manganês
m-Si	Silício monocristalino
MW	Megawatt
Na	Sódio
ne	Índice de refração extraordinário
No	Refração ordinária
O	Oxigênio
p-Si	Silício policristalino
Se	Selênio
Si	Silício
SiCl <sub>4</sub>	Tetracloroeto de Silício
SiGM	Silício de grau metalúrgico
SiGMM	Silício de grau metalúrgico melhorado
SiGS	Silício de grau solar
SiH <sub>4</sub>	Silano
SiHCl	Triclorosilano
SiHCl <sub>3</sub>	Triclorosilano
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
Ti	Titânio
V	Vanádio
µm	Micrometros

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEORICO.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Aspectos Históricos.....</b>	<b>2</b>
2.2	Aspectos Geológicos.....	2
2.2.1	Contexto Geológico Regional .....	4
2.3	Aspectos Econômicos .....	5
2.4	Aspectos Físico-químicos .....	6
2.4.1	Quartzo.....	6
2.4.2	Propriedades básicas do quartzo .....	7
2.5	Lavra e processamento .....	8
2.5.1	Lavra .....	8
2.5.2	Processamento.....	8
2.6	Usos e Aplicações do silício obtido através do quartzo.....	9
2.7	Sistemas Fotovoltaicos .....	10
2.7.1	O Efeito Fotovoltaico .....	11
2.7.2	Classificação das células fotovoltaicas.....	11
2.7.3	Aplicações dos sistemas fotovoltaicos .....	15
2.8	Purificação do Silício Grau Solar.....	17
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E METODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1	Desenho do estudo .....	21
3.2	Objeto do estudo.....	21
3.3	Local e Período de Realização da Pesquisa.....	21
3.4	Apresentação das técnicas .....	23
3.5	Análise e Apresentação dos Dados .....	23
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>24</b>
4.1	Cooperativa dos Garimpeiros de Cristalândia - Cooper Cristal.....	24
4.2	Cadeia Produtiva.....	25
4.2.1	Pesquisa geológica .....	25
4.2.2	Mapeamento e Projeção da Reserva Mineral .....	25
4.2.3	Lavra e classificação .....	25
4.2.4	Beneficiamento.....	26
4.2.5	Comercialização .....	27
4.3	Caracterização tecnológica do cristal de Quartzo do Garimpo Baixa da Água em Cristalândia. ....	27
4.3.1	Resultados das análises do laboratório.....	29
4.4	Alternativas para dinamizar a economia do quartzo .....	29

4.5	Energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira e no Tocantins....	30
4.6	Lavra Experimental .....	33
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A temática voltada para sustentabilidade na geração de energia tem configurado uma gama de esforços no sentido de se criar alternativas de energia limpa e renovável. Os recursos naturais empregados nessa usabilidade requerem práticas de consumo e exploração estabelecidas em eixos sustentáveis e conscientes.

Este projeto de pesquisa é conduzido como parte das atividades do Núcleo de Empreendedorismo e Inovação (NEI) do CEULP/ULBRA e dentro do grupo de pesquisa de Redes de Colaboração, cadastrado no CNPq. O projeto tem como objetivo estudar a cooperativa de Cristalândia –TOCANTINS no que se refere ao bem mineral local, o quartzo.

Com base nisso foi realizado um estudo bibliográfico para destacar as principais informações a respeito do processo do beneficiamento local, caracterização do quartzo com a técnica de método Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS) que possibilitou a identificação da a qualidade do material coletado no Garimpo Baixa da Água em Cristalândia – Tocantins.

Também foram destacadas informações sobre o quartzo no que envolve suas características físico-químicas, históricas, dados relevantes sobre sua produção no Brasil e mundo e principalmente um panorama atual sobre a tecnologia aplicada nas Células Fotovoltaicas e o potencial energético brasileiro

Com os resultados obtidos foi possível vislumbrar o processo de beneficiamento desse minério, aprimorando a cadeia produtiva na Cooperativa e Mineração dos Garimpeiros de Cristalândia – COOPERCRISTAL, contribuindo com análises e alternativas para o desenvolver o setor no Tocantins. Portanto, este trabalho realizou um estudo do quartzo produzido na Cooperativa e Mineração dos Garimpeiros de Cristalândia – COOPERCRISTAL, para verificação dos níveis de pureza e aptidão para uso na fabricação de células fotovoltaicas e conseqüentemente aumentar o valor agregado ao minério extraído na região, expondo os desafios para a viabilização do bem mineral na indústria fotovoltaica e propõe alternativas para aprimorar a cadeia produtiva mineral, contribuindo para o desenvolvimento regional.

## **2 REFERENCIAL TEORICO**

Este projeto de pesquisa tem como foco analisar o caminho técnico a ser percorrido da extração do quartzo até a produção de células fotovoltaicas, contextualizando os principais desafios e oportunidades associados a essa rota tecnológica.

### **2.1 Aspectos Históricos**

No que tange o contexto histórico sobre o minério de quartzo, foi citado pelo geógrafo Estrabão (64 A.C.) e pelo naturalista grego Plínio, o Velho (23 D.C). Os estudos sobre suas propriedades foram iniciados pelo cientista dinamarquês N.Stenon, em 1669, e pelo mineralogista francês Jean-Baptiste Louis Romé de l'Isle, em 1783. (BARBOSA; PORPHÍRIO, 1995).

Conforme Luz e Braz (2000) foi na II Guerra Mundial que o quartzo brasileiro tomou destaque internacional, o país era o principal fornecedor dos Estados Unidos de lascas de quartzo de grau eletrônico necessários para produção de instrumentos de comunicação analógica usados na guerra. As dificuldades impostas pela Alemanha com os seus submarinos dificultaram a entrega de mineral e tornou crítica a demanda, em vista da necessidade da matéria prima nos equipamentos de comunicação. Com a situação crítica os Estados Unidos e a Alemanha realizaram pesquisas para viabilizar substitutos do quartzo e sua síntese.

Em 1974, o governo brasileiro fez restrições comerciais que embargaram o carregamento de quartzo e desencadeou uma crise internacional pela falta de suprimento, tais ações refletiram diretamente na elevação do preço em dez vezes mais e a utilização do quartzo cultivado como substituto do minério in natura. Como consequência principal, uma corrida tecnológica aconteceu entre os Estados Unidos e Japão sobre a fabricação do quartzo cultivado, antes do fim da década de oitenta, o Japão tinha metade da capacidade de produção mundial do cultivo que acabou possibilitando ao país adotar a estratégia de produção para atender a demanda de sua indústria (LUZ; BRAZ, 2000).

### **2.2 Aspectos Geológicos**

Quando a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é submetida a diferentes graus de temperatura e pressão, o quartzo é formado, a formação mineralógica é representada pela combinação do

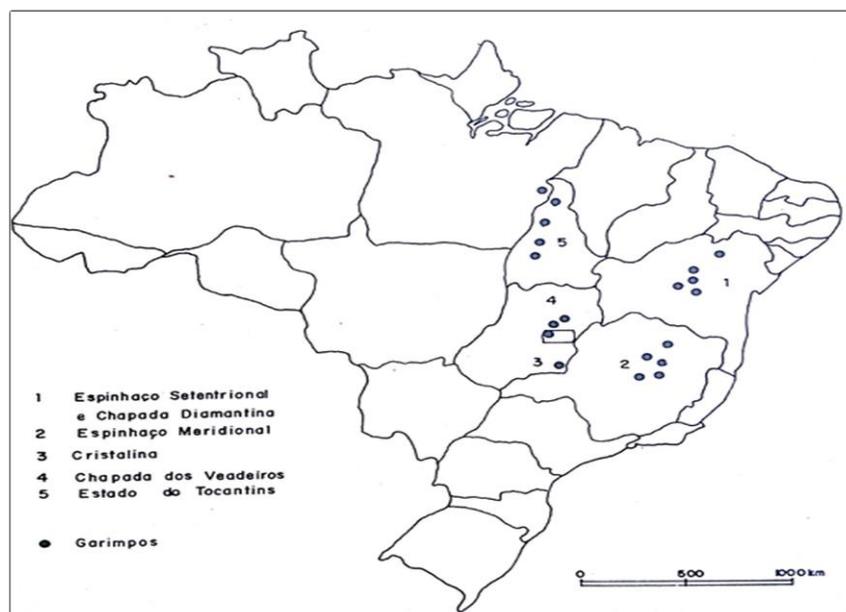
oxigênio e silício que constituem os minerais silicáticos (feldspatos e piroxênios) e os minerais de sílica pura (BRASIL, 1997).

A formação dos depósitos de quartzo no Brasil pode acontecer por veios pegmatitos pertencentes na escala geológica tectono-metamórfico brasileiro e tem como características a ocorrência do quartzo leitoso composto com feldspatos, micas e outros minerais. Também tem como formação os filões hidrotermais, a origem destes está relacionada ao evento Brasileiro (650 e 600 Ma) e fornecem o quartzo hialino (cristal de quartzo), fragmentos ou lascas de quartzo ou cristal. Entretanto, a grande parte desses veios é formada por quartzo leitoso que possui uma menor qualidade do que o quartzo hialino. Os depósitos estão localizados nos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás e Tocantins (BRASIL, 1997).

No Estado do Tocantins, localiza-se o antigo Cinturão Norte de Goiás com afloramentos que seguem um lineamento norte-sul, indo desde Formoso do Araguaia, ao sul, até Xambioá, ao norte, passando por Duerê, Cristalândia, Pium, Monte Santo, Pequizeiro e Arapoema (ARCOVERDE, 1998b; CERQUEIRA LEITE et al., 1992 apud BRASIL, 1997, p.318)

A ocorrência geológica do quartzo também acontece nos depósitos secundários, são encontrados depósitos detríticos coluvionares ou aluvionares gerados por processos erosivos de veios de quartzo com localização ao norte do Tocantins e do extremo leste do Pará (BRASIL, 1997).

Figura 1 - Principal e tradicionais regiões produtoras de cristal de rocha e lascas no Brasil.



Fonte: Brasil (1997)

A figura 1 ilustra as principais regiões produtoras de cristal de rocha e lascas no Brasil que são o Espinhaço Setentrional e Chapada Diamantina, Espinhaço Meridional, Cristalina, Chapada dos Veadeiros e o estado do Tocantins.

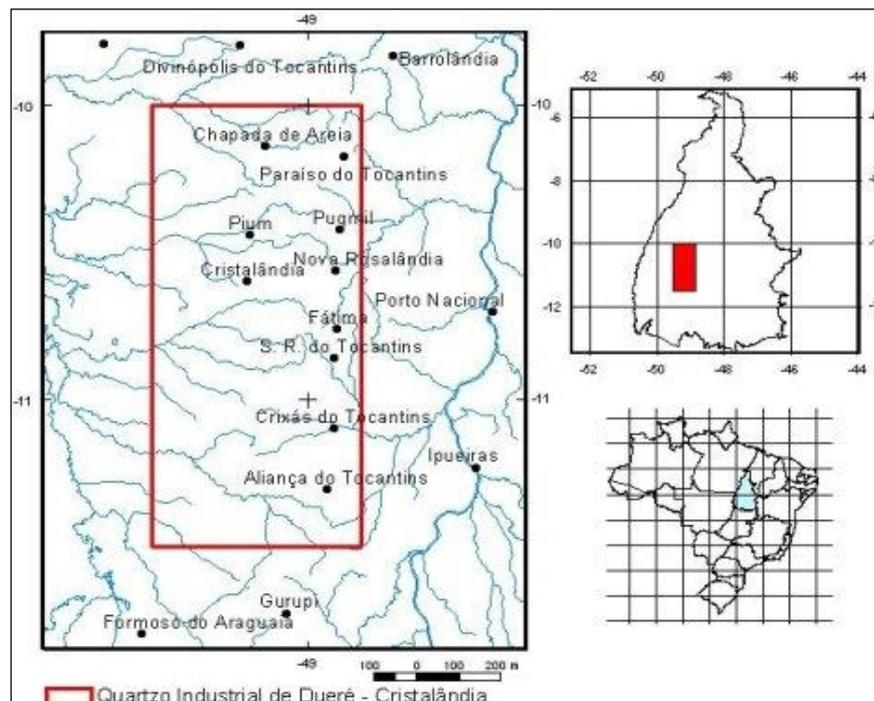
### 2.2.1 Contexto Geológico Regional

Cristalândia município localizado no Tocantins está entre as três áreas produtoras de quartzo no antigo estado do Goiás. A ocorrência mineral é descrita por apresentar filões de quartzo, cortando mica-xistos (HUMMEL, 1989; JOHSTON & BUTLHER, 1945; CAMBELL, 1946).

Em termos geológicos, esta área está relacionada ao Proterozóico Médio pertencente à Formação Xambioá ligada ao Grupo Estrondo (HUMMEL, 1989; ABREU, 1978).

As ocorrências dos veios de quartzo estão localizadas entre Cristalândia e Pium. Baixa da Égua, Da Raposa, Setor Itaporé, Setor Urubuzinho e Manchão do Felipe, Quebra Cabeça, Baiana Santa Maria e Piãosinho são alguns dos garimpos produtores de quartzo na cidade de Cristalândia (MARKO et al., 2006).

Figura 2 - Quartzo Industrial de Dueré e Cristalândia



Fonte: CPRM (2011)

Conforme Hummel (1989, p. 25), “a hipótese de gênese dos depósitos de Cristalândia é descrita como veios epigenéticos, ou seja, de formação posterior à rocha, encaixante, constituídos pela saturação de soluções hidrotermais”.

### **2.3 Aspectos Econômicos**

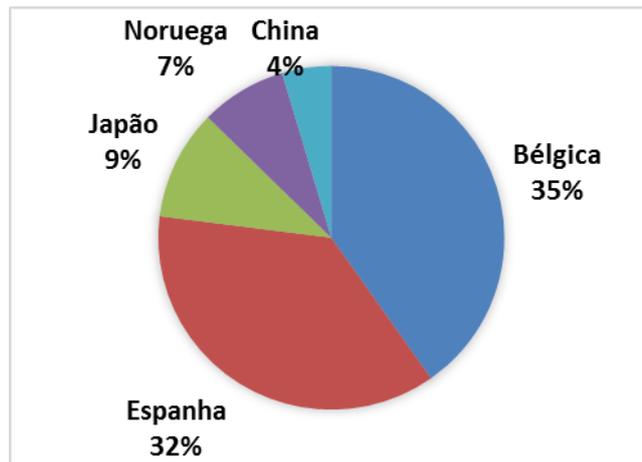
Conforme estatísticas publicadas pelo Departamento de Produção Mineral Brasileiro – DNPM (2014), as maiores reservas do cristal de quartzo ocorrem no Brasil com 95%, o equivalente a 78 milhões de toneladas. Das reservas mapeadas cerca de 64% das jazidas estão no estado do Pará, seguida de 17% em Minas Gerais, 15% em Santa Catarina, 2% na Bahia e 2% em Goiás.

Segundo o DNPM (2013), a produção interna no ano base de 2012 foi de 16.256 toneladas de cristal de quartzo, em efeito de comparação a produção de 2013 foi de 10.689 t, as informações foram públicas no Sumário Mineral, a exploração do bem mineral tem destaque para o pequeno minerador e o minerador informal. Os estados da Bahia, Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais, Santa Catarina, Pará e Espírito Santo estão em destaque na produção.

Nota-se que desde os anos 30 até o final da década de 1970, o país se destacava como fornecedor do quartzo natural, sendo posteriormente substituído pelo quartzo cultivado, que passou a obter ampla aceitação na maioria das aplicações. Os fabricantes nacionais de cristais osciladores e filtros de cristal continuam importando as barras de cristais cultivados (DNPM, 2014).

Em 2013, a produção de cristal cultivado no Brasil foi bem limitada, o continente asiático concentra os maiores produtores mundiais de quartzo cultivado diferente do que ocorre no Brasil, que tem pequenas produções com condições limitadas. Seguindo a dependência da importação deste produto de importância estratégica estão os produtos manufaturados, os cristais piezoelétricos que ao serem comprimidos geram cargas elétricas em sua superfície, importante característica à indústria eletrônica nacional. As importações de cristal de quartzo em 2012 totalizaram US\$ 35,8 milhões em sua maior parte cristal cultivado bruto e usinado (DNPM, 2014).

Gráfico 1 - Exportação de bens primários e manufaturados em 2013



Fonte: DNPM (2014)

Em relação as exportações brasileiras de quartzo bruto o gráfico 1 mostra que 35 % dos bens primários de quartzo tem a Bélgica como o principal mercado consumidor, seguido da Espanha (32%), Japão (9%), Noruega (7%) e China (4%). Em reflexo da crise econômica europeia em 2012 as exportações tiveram uma queda de 34% (DNPM 2014).

A ocorrência de quartzo acontece também em menor escala em países como Madagascar, Namíbia, China, África do Sul, Canadá e Venezuela, existem poucas informações detalhadas sobre a real reserva mundial de quartzo (DNPM 2014).

## 2.4 Aspectos Físico-químicos

As principais informações sobre as características físico-químicas do quartzo serão descritas resumidamente a seguir.

### 2.4.1 Quartzo

A fase estável da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) à temperatura ambiente, conhecida como quartzo- $\alpha$ , é um dos minerais mais abundantes da crosta terrestre, cerca de 12% (LUZ; LINS, 2005 apud FRONDEL, 1962). Ela ocorre na composição de rochas magmáticas, sedimentares e metamórficas, na forma monocristalina (quartzo hialino, ametista, citrino, etc.), na forma policristalina (quartzito, calcedônia e ágata) e amorfa (LUZ; LINS, 2005).

A maior parte dos cristais tem aspecto opaco devido às inclusões e fissuras internas, sendo denominado quartzo leitoso. O quartzo hialino ou cristal de rocha é incolor e possui grande transparência. As outras variedades de quartzo são a ametista de cor violeta, o quartzo esfumado, com diferentes intensidades de escurecimento, o quartzo negro ou murion, o citrino (amarelo e amarelo/esfumado), o quartzo róseo, o quartzo azul e o quartzo verde (prásio) (LUZ; LINS, 2005, p. 689).

De acordo com Hummel (1989) o quartzo é integrante do grupo de sílica da família dos tectosilicatos. O sistema de cristalização é romboédrico. Na natureza o quartzo ocorre com uma das formas polimórficas da sílica.

Apesar de ser considerado um composto químico de alta pureza são encontrados elementos traços de Alumínio (Al), Sódio (Na), Potássio (K), Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Manganês (Mn), Magnésio (Mg), Lítio (Li), Cobre (Cu), Cromo (Cr) e Titânio (Ti) (HUMMEL, 1989).

Segundo Argonz (2011, p. 14) “as propriedades físico-químicas que caracterizam o mineral quartzo são: dureza 7,0 na escala de Mohs, ponto de fusão 1775°C, densidade 2,65 g/cm<sup>3</sup>, índice de refração de 1.54 a 1.55”.

Conforme Hummel (1989) a piezeletricidade foi descoberta pelos irmãos Pierre e Jacques Currie em 1880, é a propriedade que rege grande parte das aplicações do quartzo eles observaram em alguns cristais quando comprimidos em direções particulares mostram cargas positivas e negativas em determinadas posições de suas superfícies, as cargas são proporcionais a pressão aplicada e desaparecem quando a pressão é retirada.

#### **2.4.2 Propriedades básicas do quartzo**

Barbosa e Porphirio (1995, p.5) descrevem: “a estrutura cristalina do quartzo foi determinada pelos físicos britânicos W.H. Bragg e W.L. Bragg, em 1914, com o advento da difração de raios-X, que valeu ao pai e ao filho, o Prêmio Nobel de 1915”.

Segundo Luz e Lins (2008) as propriedades físicas no quartzo mais relevantes são as elásticas e ópticas. As propriedades elásticas do quartzo correspondem a um conjunto constantes de rigidez e de flexibilidade. O quartzo possui grande rigidez elástica, quando comparado a outros sólidos de peso específico semelhante, e suas constantes elásticas são pouco afetadas pela variação de temperatura.

O quartzo é também um meio opticamente anisotrópico, classificado como um cristal uniaxial positivo dotado de polarização rotatória. Os cristais da classe 32 possuem dois índices de refração denominados índice de refração ordinária ( $n_o$ ) e índice de refração extraordinário ( $n_e$ ). A dupla refração não ocorre quando a luz atravessa o cristal segundo a direção paralela ao eixo cristalográfico  $c$ , conhecido como eixo óptico (LUZ; LINS, 2008).

## **2.5 Lavra e processamento**

A lavra e o processamento dos cristais de quartzo podem ser realizados e selecionados de diferentes formas que variam desde as condições estruturais do meio em questão, até as condições financeiras, esses métodos diferentes serão descritos a seguir:

### **2.5.1 Lavra**

Luz e Lins (2008) descrevem que a lavra de quartzo natural no Brasil acontece manualmente por lavra a céu aberto e subterrânea, a segunda em escala menor. Em torno de um afloramento, geralmente nas escavações são utilizadas pás, picaretas e carregadeiras de pequeno porte. A exploração dos veios hidrotermais ocorre verticalmente.

Uma vez encontrado, a massa de quartzo, constituída por regiões leitosas e hialinas, é removida pela ação mecânica de marretas, martelos e punções, e em algumas ocasiões, explosivos. Os blocos resultantes são fragmentados manualmente dando origem a blocos menores (lascas) com o objetivo de separar os fragmentos em função de sua transparência visual (LUZ; LINS, 2008)

Todavia conforme publicação do Ministério de Minas e Energia – MME (2009) observa-se que é necessário um cuidado na mecanização da exploração, devido à complexidade na extração do quartzo e pode causar danos na estrutura do cristal por quebra. Mesmo com grandes reservas de cristal de quartzo com alta qualidade, o garimpo domina a exploração, logo é visto a necessidade de investimentos com uma política de estímulo à industrialização e agregar valor à matéria prima e com isso diminuir a dependência de produtos manufaturados.

Luz e Lins (2008, p. 695) diz que

A pesquisa e prospecção dos veios hidrotermais e corpos pegmatíticos de quartzo são praticamente inexistentes, comprometendo tanto a avaliação econômica quanto o seu projeto de lavra dos depósitos. No Brasil, essa situação não diz respeito apenas ao quartzo, mas à maioria dos minerais industriais.

### **2.5.2 Processamento**

O produto final do quartzo é definido pela transparência visual do cristal que por sua vez pode ser destinado às indústrias eletrônicas e ópticas. A maior parte do quartzo natural lavrado dos veios hidrotermais destina-se à produção de pequenos fragmentos (LUZ; LINS, 2008).

Para Luz e Lins (2008) as lascas são classificadas em seis classes, a primeira com transparência total, desprovida de inclusões e fissuras internas que possam ser observadas a olho nu em ambiente bem iluminado. Para as classes subsequentes, mista, segunda, terceira, quarta e quinta e estão associadas ao teor de inclusões fluidas (regiões leitosas) e fissuras. A transparência visual diminui gradativamente, devido que o teor de inclusões e fissuras tende a aumentar.

Figura 3 - Classificação visual das lascas de quartzo



Fonte: Hummel (2005).

Na figura 3 constam algumas das lascas de quartzo classificadas de acordo com a inspeção visual adotada, essa classificação não é baseada em nenhum parâmetro que leve em consideração aspectos como pureza ou perfeição cristalina.

## 2.6 Usos e Aplicações do silício obtido através do quartzo

O quartzo tem uma série de aplicações que variam de acordo com suas propriedades físico-químicas. Para aplicação em alta tecnologia, os blocos de cristais naturais são submetidos a um processo de: inspeção corte e caracterização para atender as especificações da qualidade para o uso piezelétrico ou em sementes no crescimento de quartzo sintético que são aplicadas na fabricação de componentes eletrônicos utilizados nas indústrias eletrônica, de telecomunicações e de eletrodomésticos (ARGONZ, 2011).

As lascas naturais de quartzo com menor que 200  $\mu\text{m}$  são usadas como matéria prima para obtenção de quartzo fundido em forma de tubos, barras, brutos de fusão e

vidrarias para laboratórios. A silícica também é utilizada na indústria de semicondutores e óptica (ARGONZ, 2011).

Brasil (1997, p.317) define que “quanto às substituições, nos setores de consumo onde as exigências de pureza não são tão rigorosas, o quartzo é eventualmente substituído por áreas e quartzito”.

A produção de silício grau solar está ligada ao silício grau eletrônico. Este é aproveitado na indústria da microeletrônica para a fabricação de semicondutores e circuitos integrados. O silício grau solar, é um produto intermediário desta indústria que implica na ligação entre o produtor de silício grau solar pela rota química e o mercado de silício grau eletrônico (EPE, 2012; CGEE, 2009).

Para fabricação de células solares para geração de energia elétrica por fotoconversão de energia solar, a exigência de pureza do quartzo varia 99,9999999 % a mais que o silício de grau eletrônico (ARGONZ, 2011).

## **2.7 Sistemas Fotovoltaicos**

Os sistemas fotovoltaicos descritos pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (2014) são fundamentados em painéis ou módulos compostos de células fotovoltaicas, dispositivos que captam a energia da luz solar e produzem corrente elétrica, esses sistemas são constituídos de um bloco gerador que contém os arranjos fotovoltaicos.

Um módulo fotovoltaico é combinado por células fotovoltaicas conectadas em arranjos que produzem tensão e corrente para utilização prática de energia. O número de células conectadas em um modelo e seu arranjo pode ser composto por série ou paralelo, esse termo varia de acordo com as especificações de tensão e corrente elétrica. Um fator importante a ser observado é saber escolher qual o tipo de celular usar na fabricação devido às características elétricas, caso haja incompatibilidade pode limitar o desempenho e reduzir a eficiência do módulo (CRESESB, 2014).

O processo de produção dos módulos é automatizado, fator que reduziu a interferência humana, eficiência alcançada devida o avanço da tecnologia. A produção industrial é realizada em série de grandes quantidades, garantindo a redução dos preços e assegurando a manutenção (CRESESB, 2014).

Alguns aspectos devem ser levados em consideração sobre a produção de células e painéis fotovoltaicos, a China que tem o potencial tecnológico que detém quase 50% da capacidade mundial e o investimento em células solares e módulos

fotovoltaicos ocorre em duas etapas, primeiro são instaladas as fábricas de células solares e módulos fotovoltaicos e, em seguida, desenvolve-se a produção de silício grau solar no país (EPE, 2012).

O restante da capacidade mundial está dividido entre em Taiwan (> 15%), Europa (> 10%), Japão (pouco menos de 10%) e Estados Unidos (menos de 5%) (EPE, 2012).

O Brasil por ter uma das maiores reservas mundiais de quartzo com alto teor de qualidade tem a vantagem de ter a tecnologia de beneficiamento e fabricação de células fotovoltaicas (EPE, 2012).

### **2.7.1 O Efeito Fotovoltaico**

Em 1839 que Edmond Becquerel relatou o efeito fotovoltaico como o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz e a célula fotovoltaica é a unidade fundamental para essa conversão (CRESESB, 2006). A primeira célula fotovoltaica foi produzida em 1883 pelo inventor americano Charles Fritts que revestiu a célula com uma camada de ouro no material semicondutor (ABINEE, 2012).

Conforme Ferreira (1993, p.24) “para compreender os princípios de funcionamento de uma célula solar, é necessário entender as propriedades básicas dos materiais semicondutores, que são o suporte físico das mesmas”.

O processo de geração de corrente elétrica da célula fotovoltaica começa com a absorção da luz sendo transferida aos seus átomos e elétrons, com isso, os elétrons desprendem-se dos átomos, assim propiciando o fluxo elétrico (GHENSEV. 2006).

### **2.7.2 Classificação das células fotovoltaicas**

As células fotovoltaicas disponibilizadas comercialmente são elaboradas à base de silício monocristalino, policristalino e amorfo, mas também há células fabricadas com outros materiais, como o disseleneto de cobre-indio (CIS) e telureto de cádmio (CdTe). Essas tecnologias são descritas a seguir:

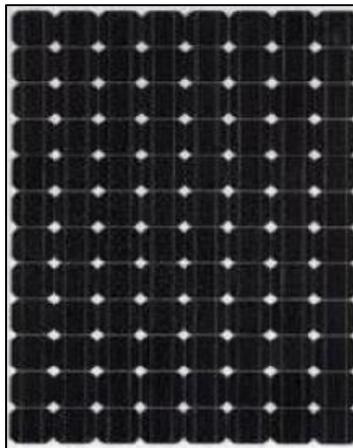
#### **2.7.2.1 Silício Monocristalino (*m-Si*)**

Ghensev (2006) descreve que o processo de obtenção das Células Fotovoltaicas de (mc-Si) é feito pelo silício policristalano (p-Si) através do método Czochralski pode ser realizada a purificação do silício obtendo-se com um grau de pureza de 99,99999%. Nesse procedimento, o silício é fundido juntamente com uma

pequena quantidade de dopante, se utiliza átomos de boro do tipo P. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, vai se extraindo do material fundido em forma cilíndrica de silício monocristalino. Este cilindro é cortado em lâminas ou wafers de aproximadamente 300µm para produção das células e módulos fotovoltaicos (CRESESB, 2006).

Após o corte é feita a limpeza dessas fatias por lapidação, ataque químico e polimento, após são introduzidos átomos de fosforo do tipo N, assim formando o que se chama de junção pn. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000°C (CRESESB, 2006).

Figura 4 - Célula de silício monocristalino (m-Si)



Fonte: Takata (2015)

A figura 4 ilustra uma célula fotovoltaica de silício monocristalino (m-Si). A eficiência deste tipo de célula fotovoltaica varia de 12 a 15% e são as mais utilizadas e comercializadas com garantia de uso de 25 anos. (GHENSEV, 2006).

#### 2.7.2.2 Silício Policristalino (p-Si)

As técnicas de fabricação do p-Si são similares as utilizadas no m-Si. Para a obtenção das células fotovoltaicas de (p-Si) a matéria prima utilizada é o dióxido de silício sujeito ao processo de redução em temperatura a 2000°C junto com o Coque ( $\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$ ), que permite a obtenção do Silício grau Metalúrgico, apresentando uma pureza de 98 a 99% (GHENSEV, 2006).

Figura 5 - Célula de Silício Policristalino (p-Si)



Fonte: Takata (2015)

A figura 5 ilustra uma célula fotovoltaica de silício policristalino (p-Si). Para efeito de comparação, a eficiência deste tipo de célula na conversão de luz em eletricidade, é menor do que as de silício monocristalino variando de 12 a 14%. (GHENSEV, 2006).

### 2.7.2.3 Filmes Finos

No intuito de se buscar alternativas na fabricação de células fotovoltaicas, atualmente há três tipos de módulos fotovoltaicos de filme fino disponíveis no mercado que são fabricados a partir de Silício Amorfo (a-Si), disseleneto de cobre-indio (CIS) e telureto de cádmio (CdTe).

As eficiências das células fotovoltaicas de filmes finos podem ser verificadas na Tabela 1.

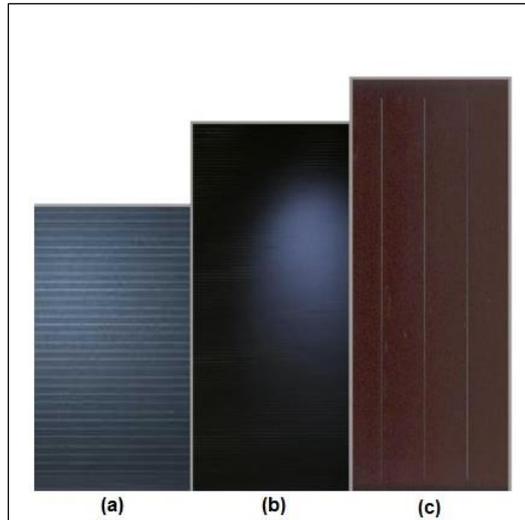
Tabela 1: Eficiências das células fotovoltaicas de filmes finos.

<b>Tipo de Célula</b>	<b>Eficiências (%)</b>
Silício amorfo (a-Si)	5%(1) - 9,5%(2)
Disseleneto de cobre-indio (CIS)	7%(1) - 19,2%(2)
Telureto de cádmio (CdTe)	8%(1) - 16,5%(2)

Fonte: (1) ASIF, 2008a; (2) PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS, 2008.

As células fabricadas pelos filmes finos possuem um menor número de etapas e menor custo comparado com outras e correspondem a 12% da produção mundial, contudo é preciso destacar que estas células ainda não conseguiram atingir o nível de eficiência em comparação com o silício monocristalino e policristalino (ABINEE, 2012; CRESESB, 2014).

Figura 6 - Célula de Filmes Finos



Fonte: Urbanetz Junior (2014)

A figura 6 ilustra os três modelos de células fotovoltaicas produzidas a partir de filmes finos, (a) Disseleneto de cobre-índio, (b) telureto de cádmio e (c) Silício Amorfo. Para os três modelos podem ser aplicados em substratos de baixo custo (plásticos, vidros e metais) rígidos ou flexíveis revestidas de proteção mecânica (EPE, 2012)

Os aspectos importantes que se podem destacar em relação as células fotovoltaicas de Disseleneto de Cobre e Índio é que as fabricações desses painéis solares têm vantagem pela boa aparência estética e com um mercado de venda para grandes superfícies em  $m^2$ . Seu material é composto pelos elementos químicos Cobre (Cu), Índio (In) e Selênio (Se) Telureto de Cádmio (CdTe). As Células fotovoltaicas fabricadas com base no Disseleneto de Cobre e Índio. Um fator negativo é a toxicidade dos elementos e a pouca abundancia dos mesmos (GHENSEV, 2006).

Entre os filmes finos Telureto de cádmio (CdTe) tem amplo aproveitamento para sua aplicação na fabricação de células fotovoltaicas, devido sua eficiência na conversão energética e absorção a radiação solar e a alta taxa de resistividade a defeitos na estrutura cristalina evitando sua danificação.

Para Ghensev (2006, p.96) “a denominação Telureto de Cádmio é devido à composição do elemento base, o Telúrio, com outros elementos (metal, hidrogênio ou íons similares) que no presente caso, é composto como Cádmio”.

As células fotovoltaicas de silício amorfo (a-Si) tem menor eficiência, apresenta uma estabilidade e desempenho baixos, pois sofre uma degradação inicial na operação devido a irradiação que diminui sua eficiência de conversão de energia e

como contrapartida alguns fabricantes dão garantia de funcionamento de até 10 anos (CRESESB, 2014; GHENSEV, 2006).

De acordo com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (2014, p.51):

A terceira geração, ainda em fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), testes e produção em pequena escala, é dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV Concentrated Photovoltaics), células sensibilizadas por corante (DSSC–Dye-Sensitized. Solar Cell) e células orgânicas ou poliméricas (OPV–Organic Photovoltaics). A tecnologia CPV, por exemplo, demonstrou ter um potencial para produção de módulos com altas eficiências, embora o seu custo ainda não seja competitivo com as tecnologias que atualmente dominam o mercado.

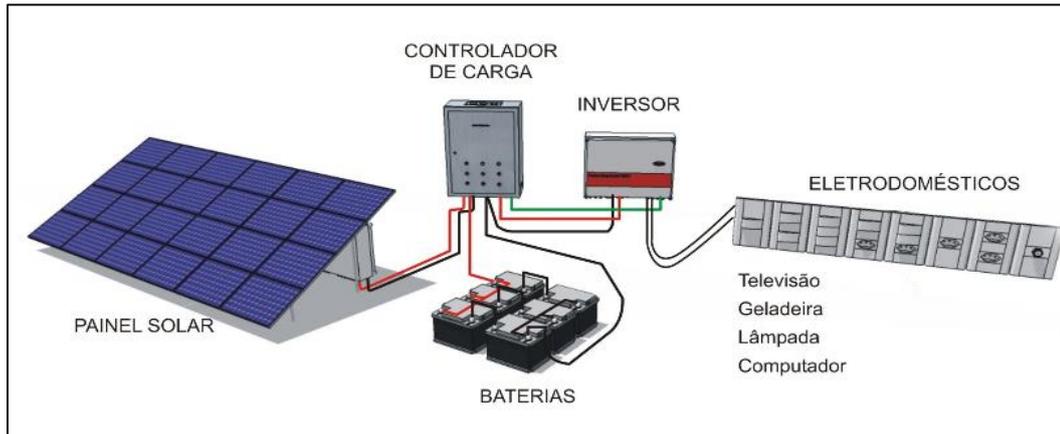
### **2.7.3 Aplicações dos sistemas fotovoltaicos**

O custo da geração solar fotovoltaica vem caindo constantemente, é possível demonstrar que no futuro, o preço da energia gerada por um sistema solar fotovoltaico instalado por um consumidor residencial sobre o seu telhado poderá ser de menor preço do que o sistema convencional usado atualmente, não só se aplica ao consumidor residencial, mas também a indústria. Nesse tópico será feita uma síntese geral das principais informações sobre os dois tipos de aplicação dos sistemas fotovoltaicos, os domésticos isolados ou autônomos e distribuídos conectados à rede.

#### *2.7.3.1 Domésticos Isolados ou Autônomos*

Provê eletricidade às residências e que não estão conectados ao sistema de rede de distribuição de eletricidade da concessionária local (IEA-PVPS, 2006). No Brasil, estes sistemas atendem às comunidades isoladas, fornecendo eletricidade, na maior parte dos casos, para iluminação, refrigeração e outras cargas baixas de energia (CRESESB, 2006).

Figura 7 - Modelo de sistema fotovoltaico isolado



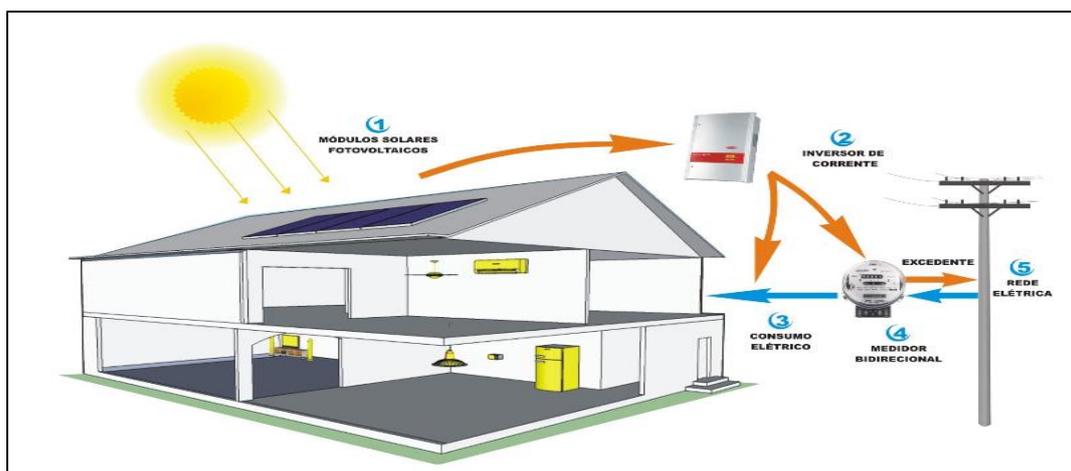
Fonte: Takata (2015)

A figura 7 mostra o processo de geração de energia pelo modelo fotovoltaico isolado. O armazenamento da energia pode ser feito em baterias e contam com uma unidade de controle e condicionamento de potência, composta por inversor e controlador de carga, importantes para não deixar que haja danos por sobrecarga ou descarga profunda (CRESESB, 2006).

### 2.7.3.2 Distribuídos Conectados à Rede

Os sistemas solares fotovoltaicos conectados à Rede apresentam duas configurações: os sistemas fotovoltaicos conectados à rede de forma distribuída e os sistemas fotovoltaicos centralizados. Os sistemas fotovoltaicos distribuídos podem ser instalados de forma integrada a uma edificação, no telhado ou na fachada de um prédio.

Figura 8 - Modelo de sistema fotovoltaico conectados à rede



Fonte: Takata (2015)

Na figura 8 exemplifica que não tem a necessidade de armazenamento, em vista que está conectado à rede de energia. Todo o arranjo é conectado em inversores e logo em seguida guiados diretamente na rede. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada (CRESESB, 2006).

Como características principais, esses sistemas são instalados para fornecer energia ao consumidor, que pode usar a energia da rede elétrica convencional para complementar a quantidade de energia demandada. O consumidor pode também vender a energia gerada pelo sistema para a distribuidora, caso use menos energia do que a gerada pelo sistema (MAYCOCK, 1981; MARKVART, 2000; RÜTHER et al., 2005; IEA-PVPS, 2006).

## **2.8 Purificação do Silício Grau Solar**

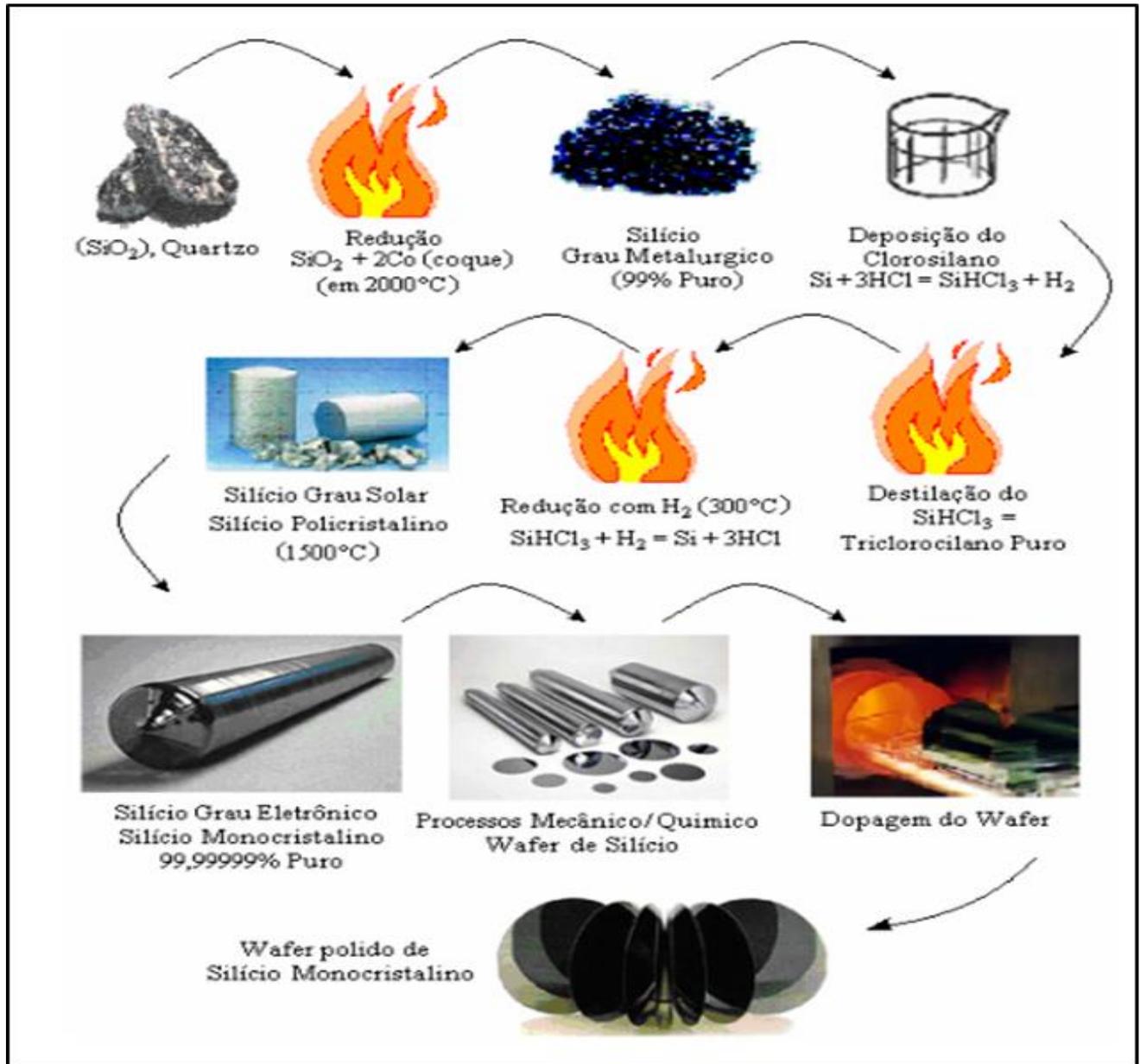
O silício precisa ter um alto índice de pureza para produção de células fotovoltaicas, para chegar a tal ponto é feito a purificação do silício, esse procedimento pode ser feito diversas maneiras. No Brasil ainda não existe purificação de silício de grau solar em nível comercial. Grupos de pesquisas em universidades e algumas empresas estão desenvolvendo em nível laboratorial o processo de purificação por via química e metalúrgica, a segunda que envolve um menor consumo de energia e já se tem resultados positivos (ABINEE, 2012).

Entretanto, expõe-se algumas dificuldades em encarar desafios técnicos até chegar em escala comercial, a maior barreira para a purificação do silício é a energética, custos de eletricidade, custos com operação e manutenção de plantas de purificação ainda pesa como fator negativo (ABINEE, 2012).

Ghensev (2006) cita o método químico como técnica, baseado na decomposição dos compostos de Silício após sua purificação. Alguns dos compostos utilizados são o Triclorossilano ( $\text{HSiCl}_3$ ), o Tetracloreto de Silício ( $\text{SiCl}_4$ ) e o Silano ( $\text{SiH}_4$ ).

A rota química permite que seja obtido o silício de grau eletrônico, com grau de pureza mais elevado, utilizado na indústria microeletrônica, na produção de circuitos integrados. Como desvantagem esse procedimento eleva os custos de purificação e o consumo de energia elétrica (ABINEE, 2012).

Figura 9 - Etapas de purificação do silício por rota química



Fonte: Ghensev (2006)

A figura 9 ilustra o resumo do processo de purificação do silício policristalino e monocristalino. Conforme Ghensev (2006) o processo químico é feito pela redução do quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) por coque (C) em fornos com temperaturas de até  $2000^\circ\text{C}$  em silício de grau metalúrgico (SiGM) com pureza de 98 % a 99%. Posteriormente para se obter o silício de grau solar é feita a cloração do silício adicionado o ClH (Clorídrico) no silício grau Metalúrgico, obtém-se o  $\text{SiHCl}_3$  (Triclorosilano). A redução do triclorosilano puro com o hidrogênio obtém-se o silício grau eletrônico, ou silício policristalino.

Após a semente ter sido cristalizada e fundida, a peça inserida será retirada e formando o lingote monocristalino, que são cortados em finas fatias, os wafers que

posteriormente vão receber uma formatação final na célula fotovoltaica, vão ser testadas e por fim incorporadas nos módulos até chegar ao consumidor final (ABINEE, 2012).

Conforme Carvalho, Mesquita e Rocio (2014) a rota metalúrgica é uma outra possibilidade para se obter o silício de grau solar (SiGS), que consiste na purificação do silício de grau metalúrgico (SiGM) por meio da rota que produz o silício de grau metalúrgico melhorado (SiGMM), inovação realizada por altos investimentos de universidades, empresas e institutos no Brasil.

Essa rota tem desafios tecnológicos complexos, muito mais do que econômicos por estar em expansão e não totalmente dominada. Os processos de operação envolvidos na purificação do silício são fusão, solidificação controlada, refino piro e hidrometalúrgico (CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014).

Segundo Carvalho, Mesquita e Rocio (2014) o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) que vem trabalhando constantemente com o desenvolvimento de projetos voltados para Rota metalúrgica para produção de Silício Grau Solar em parceria com a empresa - Companhia Ferroligas Minas Gerais onde fornece o silício metálico para produzir o silício purificado. Pode-se afirmar que se atingiu o refino pretendido, o aumento da pureza do silício de 99,5% (SiGM) para um teor maior que cinco nozes de pureza (>99,999% – SiGS).

Outras empresas desenvolveram rotas metalúrgicas. A japonesa Kawasaki Steel Corporation segue o processo de obtenção de SiGS por via de uma planta piloto que consiste em reações em alto vácuo, solidificação direcional e o uso de plasma térmico com vapor d'água ABINEE, 2012).

Nesse processo, um silício grau metalúrgico mais puro foi tratado sob vácuo para remover o fósforo, o alumínio e o ferro. Uma purificação ainda maior foi obtida por solidificação direcional, e o teor de boro foi reduzido com tratamento através um arco plasmático de Argônio e vapor d'água, seguido de uma nova solidificação direcional para se chegar ao silício grau solar. No entanto, duas solidificações, tratamento com arco plasmático e vácuo fizeram com que o preço final do silício ficasse muito além dos valores de mercado (SERODIO, 2009, p.21).

Diferente da rota química, a metalúrgica não permite o desenvolvimento de silício grau eletrônico, por ter uma produção mais enxuta e um investimento na planta de purificação menor do que a utilizada na rota química. É necessário observar que

existem desafios a serem superados no quesito de relação ao controle de impurezas e a fabricação em escala comercial (ABINEE, 2012).

Figura 10 - Sequência de rota metalúrgica desenvolvida pela Elkem Solar.



Fonte: ABINEE (2012)

A Figura 10 a rota metalúrgica utilizada pela Elkem Solar, processo que demorou 25 anos para ser desenvolvido. Na etapa inicial o silício de grau metalúrgico é submetido ao tratamento com escoria para remoção de boro e fosforo, bem como outras substancia minerais, o Magnésio (Mg), Titânio (Ti), Manganês (Mn), e Vanádio (V). Após a solidificação, o material sofre uma cominuição (SERODIO,2009 apud ENEBANK et al,2007).

A dissolução e feita pela lixiviação ácida, com o objetivo de diminuir a concentração dos elementos contaminantes como por exemplo o Alumínio (Al), Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Titânio (Ti), Manganês (Mn), e Vanádio (V) (SERODIO,2009 apud NASHIEL'SKII, 1996; BARTHEY, 1982; LIAW, 1983 apud GRIBOV et al., 2003; DIETL, 1983).

A purificação do silício grau metalúrgico no processo final passa pela fusão e solidificação direcional, o produto obtido é fundido em um cadinho de quartzo de alta pureza com o objetivo de diminuir o grau de contaminação. Posteriormente o silício é solidificado de forma direcional de baixo para cima para que as impurezas com baixo coeficiente de segregação (exceto B e P) fiquem segregadas nos contornos de grão da parte solidificada (SERODIO, 2009).

### **3 MATERIAIS E METODOS**

De acordo com Prodanov e Freitas (2013) o caráter desta pesquisa é classificado como exploratória, proporcionando novas informações sobre o assunto. Para o desenvolvimento desse trabalho foram utilizados diversos recursos bibliográficos, testes laboratoriais que associados às orientações para o estudo de caso permitiram a finalização do mesmo.

#### **3.1 Desenho do estudo**

Assume, em geral, uma pesquisa em levantamento bibliográfico referentes à área de energia renováveis, cadeia produtiva do quartzo para elaboração de críticas e argumentos quanto aos desafios aplicados diretamente no Tocantins que estimulam a compreensão.

Quanto aos procedimentos técnicos esse projeto de pesquisa fez uso de pesquisa bibliográfica, documental observação, entrevistas e experimentos laboratoriais.

#### **3.2 Objeto do estudo**

O objetivo do trabalho consiste conhecer dados a respeito do processo de beneficiamento do quartzo de Cristalândia – TO e evidenciar a rota do quartzo, da extração até aspectos técnicos associados à sua purificação e aplicação em células fotovoltaicas. Tendo a cooperativa em Cristalândia como objeto de estudo verificando de como a universidade pode contribuir com pesquisa para superação dos desafios da mineração de quartzo em Cristalândia.

#### **3.3 Local e Período de Realização da Pesquisa**

O projeto de pesquisa é parte das atividades do NEI e do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), iniciado, no primeiro semestre de 2014. Para caracterização do trabalho, dividiu-se em duas fases, a primeira aqui apresentada baseou-se na fase de levantamento bibliográfico, a segunda fase na coleta do material de campo para análise de método Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS). A coleta de amostras de quartzo foi realizada no dia 23 de setembro de 2014 em uma visita de campo na cidade de Cristalândia do Tocantins, no garimpo Baixa da Égua da COOPERCRISTAL.

A coleta de dados realizada associada às pesquisas bibliográficas foram analisadas seguindo os objetivos traçados para construção do relatório final deste projeto de pesquisa (vide quadro 1).

Quadro 1 - Protocolo de Pesquisa, conforme sugerido por Yin (2010).

<b>Visão Geral do Projeto</b>
<p><b>Objetivo:</b> Levantar dados a respeito do processo do beneficiamento, caracterização do quartzo da Cooperativa e Mineração dos Garimpeiros de Cristalândia – COOPERCRISTAL, em paralelo com o referencial teórico.</p> <p><b>Assuntos do estudo de caso:</b> Quartzo, Beneficiamento, Purificação, Células Fotovoltaicas, Matriz Energética no Tocantins</p> <p><b>Leituras relevantes:</b> Técnicas de Caracterização Tecnológica dos Minerais, Composição Química do Quartzo, Estudo sobre a tecnologia aplicada nas Células Fotovoltaicas e Potencial Energético.</p>
<b>Procedimentos de Campo</b>
<p><b>Apresentação das credenciais:</b> Apresentação como estudante do curso de Engenharia de Minas e integrante do Núcleo de Empreendedorismo e Inovação (NEI) do CEULP/ULBRA.</p> <p><b>Acesso aos Locais:</b> Garimpos de cristal de quartzo em Cristalândia e visita ao NAP.Mineração/USP.</p> <p><b>Fonte de Dados:</b> Primárias (Visita de campo no Garimpo Baixa da Égua em Cristalândia – Tocantins) e secundárias (bibliográfica e documental).</p>
<b>Questões de estudo nos casos:</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>a) Realizar levantamento bibliográfico sobre a o cristal de quartzo</li> <li>b) Coletar material de quartzo do garimpo Baixa da Égua, situado no município de Cristalândia do Tocantins.</li> <li>c) Estudar o uso e classificação da tecnologia fotovoltaica</li> <li>d) Pesquisar as aplicações dos sistemas fotovoltaicos</li> <li>e) Descrever os tipos de células fotovoltaicas que são oriundas da matéria prima, o quartzo.</li> <li>f) Caracterizar corpos de provas de quartzo com o método Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS)</li> <li>g) Explorar alternativas para desenvolvimento da cadeia do quartzo</li> </ol>
<b>Esboço para o relatório final dos estudos de caso:</b>
<p>Apresentar a relação entre:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Práticas da Cadeia produtiva mineral e às em operação na COOPERCRISTAL</li> <li>• Análise dos resultados da caracterização mineral do quartzo</li> <li>• Alternativas para dinamizar a economia associada ao quartzo.</li> <li>• Energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira e no Tocantins</li> <li>• A contribuição da Universidade com pesquisa e desenvolvimento local</li> </ul>

**Fonte:** Autor, adaptado a Yin, (2010).

### **3.4 Apresentação das técnicas**

Além de ser uma pesquisa exploratória, o experimento laboratorial se fez necessário para caracterizar o quartzo, procedimento na qual foi realizado por um laboratório terceirizado especializado em análises. Par a realização das análises o quartzo foi enviado no estado bruto sem a prévia preparação das amostras. Os métodos utilizados foram de Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS) que consiste na absorção da luz ultravioleta ou visível por átomos no estado vapor para identificar o teor de ferro e alumínio e o Espectrofotometria do Molibdato de Amônio para identificar o teor de silício.

No trabalho são apresentados apenas dados correspondentes sobre os garimpos da COOPERCRISTAL, os sistemas fotovoltaicos e sua classificação, a inserção da energia solar fotovoltaica na matriz energética Brasileira. Contudo, os itens abordados são necessários para discussão da necessidade de investimentos na mineração no Tocantins e o desenvolvimento da região de Cristalândia, fazendo jus aos objetivos apresentados.

### **3.5 Análise e Apresentação dos Dados**

Os dados apresentados no decorrer do trabalho, norteiam a ideia da importância do aprimoramento dos estudos sobre o potencial na região de Cristalândia, uma vez que o objetivo final é identificar os processos básicos da cadeia de valor nas operações de Cristalândia, e compará-los ao estado da arte do setor, para depois sugerir melhorias de processo. Para tanto, foram promovidas análises em bibliografias relacionado ao processo de beneficiamento desse minério, assim aprimorando a cadeia produtiva na Cooperativa e Mineração dos Garimpeiros de Cristalândia – COOPERCRISTAL, contribuindo para o desenvolvimento regional.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas as características dos garimpos e da Cooperativa dos Garimpeiros de Cristalândia - Coopercristal, as análises em relação a cadeia mineral produtiva. A análise foi separada nas etapas de pesquisa geológica, mapeamento e projeção da reserva mineral, lavra, beneficiamento, aplicações do cristal de quartzo e sua comercialização.

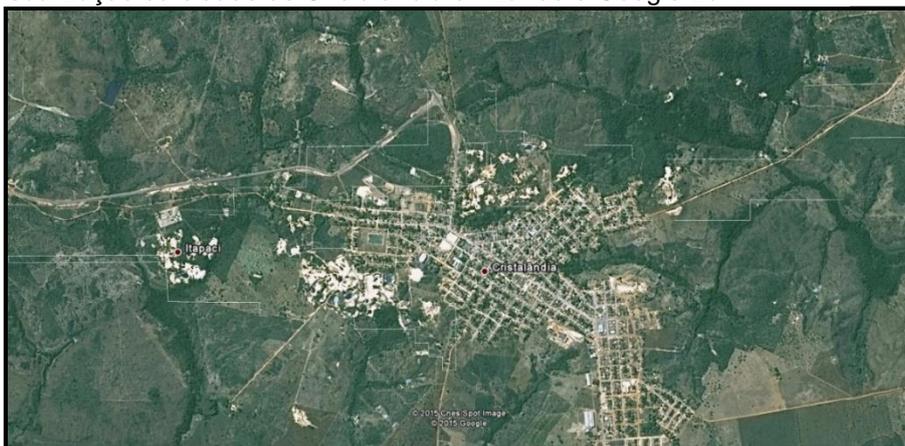
### 4.1 Cooperativa dos Garimpeiros de Cristalândia - Coopercristal

A Cooperativa de Mineração dos Garimpeiros de Cristalândia-TO, COOPERCRISTAL foi fundada no dia 02 de Setembro de 2006, como diretora presidente a Sra. Francisca Alves de Souza.

O garimpo de Cristalândia começou suas atividades de extração de quartzo no final da década de 30, o auge da exploração aconteceu entre 1939 e 1942, uma época de abundância, com o passar dos anos começou as dificuldades relacionadas com a extração mineral e a falta de equipamentos.

Em 1989 devido as condições de trabalho, os órgãos ambientais proibiram a extração. Assim, a Senhora Francisca Alves, representando os garimpeiros da região, procurou os órgãos competentes para buscar informações e regularizar a situação do garimpo, em parceria com o SEBRAE e a OCB/TO tiveram um treinamento sobre capacitação, criação de estatuto, cooperativismo e associação, visando à obtenção das licenças, a organização e o fortalecimento do grupo de Garimpeiros que se encontravam desorganizados e sem poder explorar o garimpo devido ao não atendimento das normas técnicas e ambientais vigentes.

Figura 11 - Visualização da cidade de Cristalândia utilizando o Google Earth.



Fonte: Google Earth (2015)

Hoje a COOPERCRISTAL tem uma área de 9.709 hectares e atuam 44 cooperados, onde cada uma das famílias tem sua própria escritura, exigência do Naturatins. Em 24 de agosto de 2009 a cooperativa recebeu a LO (licença de operação) e um ano depois saiu o requerimento de Permissão de Lavra Garimpeira, atualmente está em fase de renovação.

## **4.2 Cadeia Produtiva**

Neste tópico é analisado todas as fases cadeia produtiva dos garimpos de Cristalândia. A análise foi separada nas etapas de pesquisa geológica, mapeamento e projeção da reserva mineral, lavra, beneficiamento, aplicações do cristal de quartzo e sua comercialização.

### **4.2.1 Pesquisa geológica**

Devido ao grande potencial da região, embasado na própria história do município e na pesquisa (superficial) realizada pelos geólogos da Mineratins, no primeiro momento constatou-se que as jazidas têm capacidade ilimitada de extração, mas para as atividades sejam implementadas de forma sustentável e ambientalmente corretas torna-se necessário a realização de pesquisa geológica juntamente com a sondagem profunda para analisar o potencial da substância mineral existente em Cristalândia contribuindo para minimizar custos e principalmente a degradação ambiental.

### **4.2.2 Mapeamento e Projeção da Reserva Mineral**

Está sendo desenvolvido um projeto de georreferenciamento do quartzo junto com os acadêmicos de engenharia de Minas do CEULP/ULBRA com o objetivo de realizar cadastramento técnico, com utilização de imagens de satélite, das áreas de garimpo de quartzo do município de Cristalândia além de verificar a possibilidade da evolução do trabalho para um cadastro único, com as informações georeferenciadas e de sensoriamento remoto.

### **4.2.3 Lavra e classificação**

A lavra de quartzo em Cristalândia acontece mecanicamente por lavra a céu aberto. Em torno de um afloramento, são iniciadas escavações utilizando retroescavadeiras, pás, picaretas. A exploração e escolha do local é feita por olho nu, uma vez encontrado, a massa de quartzo é removida pela ação mecânica. Os blocos

resultantes são fragmentados manualmente dando origem a blocos menores (lascas) com o objetivo de separar os fragmentos em função de sua transparência visual. A figura abaixo mostra a extração de quartzo no garimpo Felipe em Cristalândia, é visível a falta de direcionamento técnico para o desmonte do minério de forma correta e sustentável.

Figura 12 - Extração de quartzo no garimpo Felipe



Fonte: Arquivo Pessoal (2014)

A figura 13 mostra o garimpo Felipe no desenvolvimento da extração de quartzo sem nenhuma orientação para desenvolvimento da frente de lavra quando a retroescavadeira chega ao lençol freático e tem contato com a água deste, é usado o desmonte hidráulico com jato d'água de alta pressão provoca um desmoronamento dos sedimentos ou rochas alteradas.

Um dos problemas que existentes na cooperativa é a falta de maquinário para melhorar o desempenho, tendo em vista que hoje tem a locação de uma retroescavadeira no valor de R\$ 250/h. Será necessário a aquisição de duas retroescavadeiras, dois tratores, duas caçambas e um caminhão muque cujo custo será reduzido em 50 % para os cooperados.

#### **4.2.4 Beneficiamento**

As lascas são classificadas em Cristalândia de acordo com a inspeção visual adotada pelos garimpeiros. Sendo a transparência do cristal está dividida em primeira

classe, segunda classe, transparentes e semitransparentes. O quartzo extraído do garimpo baixa da égua tem uma boa qualidade, sem trincas ou fissuras, no garimpo Filipe tem um quartzo de menor qualidade, até o momento o rejeito produzido não tem nenhuma utilização.

#### **4.2.5 Comercialização**

A COOPERCRISTAL encontra-se registrada e com CNPJ, teve uma produção de 457 toneladas em 2014 (considerado fraco), o material é vendido por kg para 5 estados, Rio Grande do Sul, São Paulo, Espírito Santos, Minas Gerais e Goiás. Um fator que dificulta o bom desempenho da comercialização é a falta de técnicas de negociação (os garimpeiros sabem extrair, mas não sabem para quem ou por quanto vender) e gestão (altos custos e baixa escala de produção). Isso faz com que os garimpeiros fiquem sem o poder de barganha, vendam as pedras sem o conhecimento do real valor e acabam aceitando a cotação imposta pelo atravessador.

Os garimpeiros estão conquistando uma maior confiança com a cooperativa, tentando minimizar a ação dos atravessadores.

### **4.3 Caracterização tecnológica do cristal de Quartzo do Garimpo Baixa da Égua em Cristalândia.**

Para realizar a análise do quartzo do garimpo Baixa da Égua em Cristalândia, foi realizada uma visita de campo e coleta corpos de prova, o tipo de amostragem escolhido foi o aleatório em um terreno pré-delimitado nas coordenadas com latitude de 10°36'38.68" S e longitude de 49°11'20.47", no caso a área de garimpagem, dentro de um polígono de 10 hectares. Sendo assim o objetivo da coleta de amostras aleatória não foi caracterizar o padrão da mineralização, mas sim caracterizar a qualidade do minério.

Após a coleta, o material foi enviado para análise no laboratório Terra Análises para Pecuária (LTDA), localizado em Goiânia, permitindo verificar o teor de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Figura 13 - Amostras selecionadas para análises (BE01 – 450 g; BE02 – 435 g; BE03 – 475 g)



Fonte: Arquivo Pessoal (2014)

A figura 14 mostra as três amostras de quartzo bruto sendo pesadas para serem analisadas no laboratório, sendo 1BE - 450G; 2BE - 435G; 3BE - 475G. O laboratório escolhido para analisar as lascas na primeira etapa de preparação da amostra, efetuou-se a homogeneização de todas as amostras por quarteamento até obter uma quantidade de aproximadamente 250 g. Dividiu-se esta quantidade em duas frações iguais, onde uma delas será utilizada na análise granulométrica. A outra fração, destinada à análise química, deve ser moída e passada totalmente em peneira com abertura de malha de 0,84 mm (ABNT nº 20).

Em seguida com o material cominuído foi realizada a análise granulométrica a seco, em um agitador mecânico onde as peneiras utilizadas têm aro de 20 cm de diâmetro com abertura de 4,8 mm até 0,075 mm limpas. Para evitar erros as peneiras foram limpas, secas e taradas. Para determinar o teor de silício foi utilizado o método Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS), fundamentado na extração por digestão ácida, do ferro contido na amostra e a medida de sua concentração por meio da técnica de absorção atômica.

A mesma técnica também foi utilizada para determinar o teor de alumínio. Para a determinação do silício foi utilizado o método espectrofotométrico do molibdato de amônio que consiste na extração com ácido clorídrico e ácido fluorídrico, a frio. Os extratores são ácidos fortes que promovem a dissolução da amostra, liberando o tetrafluoreto de silício. Este reage com a água para formar os ácidos silícico e fluorsilícico, que irão interagir com o molibdato, formando os complexos silico-molibdicos.

#### 4.3.1 Resultados das análises do laboratório

A partir do estudo foi possível identificar os teores dos elementos contidos nas amostras de quartzo para que posteriormente possam ser feitas análises de purificação desse material para um possível aproveitamento em células fotovoltaicas.

De acordo com as análises feitas pelo laboratório, a Tabela a seguir apresenta os resultados:

Tabela 1 – Caracterização do quartzo para teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

<b>Amostras</b>	<b>Teor <math>\text{SiO}_2</math> %</b>	<b>Teor <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> %</b>	<b>Teor <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math> %</b>
<b>BE 01</b>	<b>68,8</b>	<b>0,20</b>	<b>0,6</b>
<b>BE 02</b>	<b>61,5</b>	<b>0,19</b>	<b>0,4</b>
<b>BE 03</b>	<b>74,3</b>	<b>0,17</b>	<b>0,3</b>

Fonte: Laboratório Terra Análises (2015)

A partir dos resultados obtidos conforme a tabela 1 verificou-se que a amostra N°1 tem em sua composição 68,8 % de  $\text{SiO}_2$ , na amostra N° 2 tem 61,5% de  $\text{SiO}_2$  e na amostra N°3 tem 74,3% de  $\text{SiO}_2$ . Estas análises foram direcionadas especificamente para identificar o teor de apenas três elementos que são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . A baixa concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no quartzo de Cristalândia está relacionada à origem hidrotermal.

Contudo, os objetivos alcançados para a realização deste projeto foram obtidos com êxito, em partes consideráveis. No entanto, a ausência de ferramentas e suporte tecnológico contribuíram para a não totalidade do mapeamento da composição do quartzo estudado sendo assim necessários novas análises químicas completas para identificar os outros elementos constituintes nas amostras.

#### 4.4 Alternativas para dinamizar a economia do quartzo

Observa-se que como apontado no decorrer do trabalho, que para gerir uma melhor estrutura de trabalho em Cristalândia, requer-se não só investimentos e boa vontade política sendo que a burocratização da administração pública nem sempre é eficiente, no entanto, as limitações burocráticas e políticas minimizam o desenvolvimento precisam de revisão.

Com a falta de informações, constatasse uma desatualização dos dados existentes bem como seu mapeamento sendo ineficaz para melhoramento das diversas cadeias produtivas existentes no setor. Com a informação em domínio é

possível melhor direcionar recursos, planejar ações e fazer aplicações com melhores chances de retorno.

As faltas de ações articuladas entre a própria comunidade local comprometem os resultados das políticas públicas destinadas ao setor, onde a cadeia produtiva não apresenta plano estratégico e diretrizes para seu fomento. Neste sentido, o presente trabalho evidencia a importância na definição de políticas e a criação ferramentas/mecanismos de governança que tragam melhoria para o setor mineral. Certamente contribuirá para alavancar e diversificar a base produtiva, gerando parcerias com empresas que já dominam o estudo da arte em questão.

Em retrato da situação atual, há uma rivalidade e disputa entre os garimpeiros que não fazem parte da cooperativa e os que são, mudar essa mentalidade é vital para o desenvolvimento daquela região, com essa mudança medidas de incentivo ao desenvolvimento de Arranjos Produtivos Locais (APLs) em torno de uma renovação da cadeia produtiva, poderão ser planejadas e acompanhadas apoiando as atividades extrativas e a transformação mineral na região, é claro visando o lucro, mas sem deixar de lado o desenvolvimento compartilhado e de novas capacidades.

Destaca-se a ação da equipe multidisciplinar do Núcleo de Empreendedorismo e Inovação (NEI) do CEULP/ULBRA em desdobrar estudos para estruturar um modelo de cooperativa consciente.

#### **4.5 Energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira e no Tocantins**

O Tocantins possui privilegiada localização geográfica, evidenciando-se ser o maior potencial solar da região Norte para aplicação das características fotovoltaicas, em efeito de comparação a incidência solar do Estado é inferior ao das regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, mas em contrapartida é superior da região Sul.

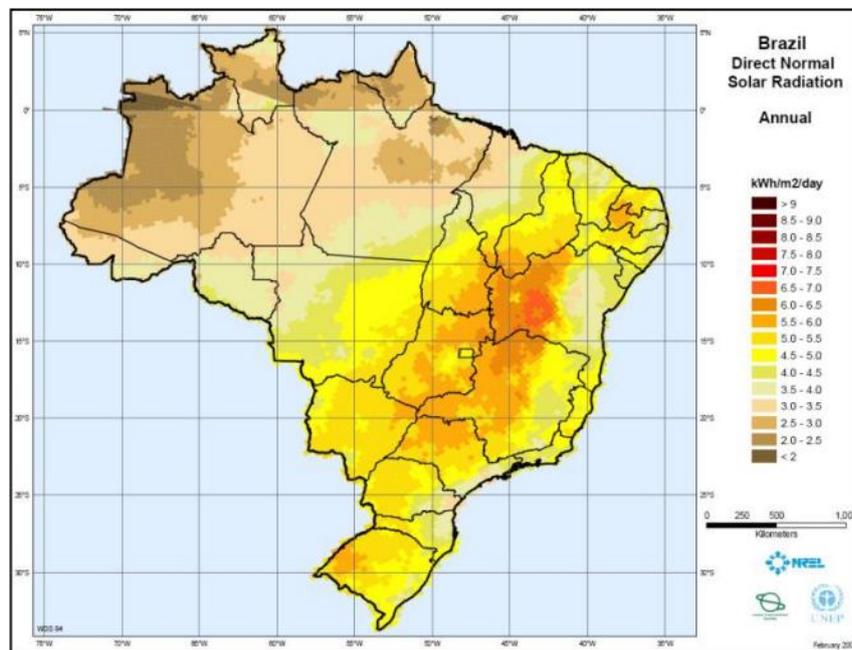
Destaca-se a potencialidade de oferta de energia oriunda de fontes renováveis, com ênfase nas usinas eólicas e usinas solares que vão server de base para elevar a matriz elétrica brasileira tendo em vista que os benefícios se aplicam na esfera socioeconômica, ambiental e estratégica, assim, aquecendo uma nova cadeia produtiva ao país.

Em alusão aos itens citados acima, ocorreu entre os dias 29/06/2015 e 01/07/2015 na cidade de Palmas – Tocantins, o I Seminário Internacional Palmas Solar onde se debateu as futuras perspectivas para o setor energético na capital e no estado. O Dr. Rodrigo Lopes Sauaia representando a Associação Brasileira de

Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) apresentou fatos que evidenciam a importância de investimentos no setor com a temática “Avaliação econômica, financeira e de emprego da energia solar”. Sauaia elucidou que Palmas apresenta excelentes condições solares com irradiação solar com média de 1870 (kWh/m<sup>2</sup>.ano)) e é a 4<sup>o</sup> melhor capital do Brasil para investir em energia solar fotovoltaica gerando atração de novos investimentos e empregos. Além das vantagens, tem o fator da competitividade; que para melhor aproveitamento requer estudos de diversas naturezas, exemplificando desempenho considerável benéfico.

A figura 11 demonstra o mapa de irradiação direta normal do território brasileiro, as legendas mostram as faixas de valores da média anual do total diário de irradiação direta normal, no que implica diretamente no auxílio dos estudos para instalar um sistema fotovoltaico na região com os valores da irradiação mais elevados.

Figura 11 – Mapa de irradiação direta normal para o território brasileiro



Fonte: Viana (2010) apud SWERA (2008)

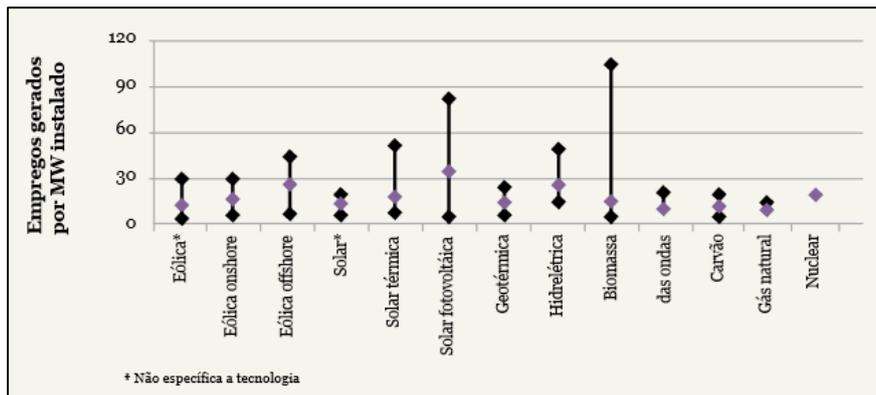
A figura 11 ilustra o mapa publicado no Atlas Brasileiro de Energia Solar, resultante do projeto SWERA, os dados obtidos no mapa são resultantes do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e co-financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF) que serviu de base para detalhar os possíveis investimentos no aproveitamento de energia solar e eólica no Brasil.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia no Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 (2014, p.368) “Políticas e projetos que objetivam a promoção da utilização de outras fontes renováveis já estão sendo integrados às políticas tecnológicas, ambiental e energética do Brasil”. A energia solar fotovoltaica está nesse projeto.

Em junho de 2015 foi aprovado na cidade de Palmas–TO, uma lei municipal que estimula o uso da energia solar como fonte alternativa à energia elétrica. Na cidade está sendo instalada a indústria de tracker, STI Norland. Este ano ainda estão previstos o segundo e o terceiro leilão nacional de energia solar. Segundo os vencedores do primeiro leilão, o BNDES e o governo brasileiro têm como meta fomentar até o final desta década o desenvolvimento local de toda logística inbound, ou seja, além da indústria de trackers e placas solares, investir na produção nacional das células fotovoltaicas.

O estado do Tocantins tem em abundância o minério de quartzo de alta qualidade, matéria prima básica para a produção de células fotovoltaicas que poderão atender as necessidades de logística inbound dos futuros leilões nacionais.

Gráfico 2 - Geração de empregos no setor fotovoltaico



Fonte: WWF (2015)

O gráfico 2 representa o comparativo da distribuição de geração de empregos por MW instalado nos diferentes setores energéticos. É notório que o setor fotovoltaico está entre as de maior capacidade, as fases de implementação que começa na instalação, fabricação, vendas e distribuição e desenvolvimentos de projetos o uso traz grandes benfeitorias para a sociedade e desenvolvimento do país no que tange geração de empregos locais de qualidade, aquecimento da economia local, regional e nacional.

Em 2013, nos EUA a instalação de cerca de 3 mil MW gerou 142 mil empregos diretos e indiretos (somando-se os empregos gerados na Instalação e na fabricação de módulos, inversores e demais materiais e insumos), cerca de 47 empregos por MW instalado. No mundo, foram gerados 1.435.000 empregos para 30 mil MW acrescentados em 2011, também equivalentes a 47 empregos por MW instalado ( WWF Brasil,2015, p.11-12).

#### **4.6 Lavra Experimental**

Como já mensurado em partes anteriores do trabalho, a produção de silício de grau solar passa por uma série de fases até chegar ao grau desejado, ainda mais com o desafio técnico de atingir pureza com operações de baixo custo.

Para se implementar uma extração sustentável é necessário mapear os processos básicos da cadeia de valor nas operações de Cristalândia e compará-los ao estudo da arte do setor, para depois sugerir melhorias de processo. Nesse papel entra a importância da Universidade, estabelecendo colaborações e convênios de apoio tecnológico e científico entre a COOPERCISTAL e a Universidade.

Uma alternativa viável para implementar essa ação seria uma mina experimental na região de Cristalândia, onde boas práticas seriam executadas com o apoio dos estudantes de Engenharia de Minas do CEULP/ULBRA desenvolvendo uma lavra de céu aberto modelo, vislumbrando a transformação do garimpo em pequena operação de mineração responsável, com uma integração das atividades de exploração mineral, lavra de minas, governança e sustentabilidade.

Exemplo de aplicação prática com o Notório Saber em lavra experimental é o Núcleo de Pesquisa para a Pequena Mineração Responsável (NAP.Mineração/USP), sediado no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

O núcleo dedica-se a pesquisas aplicadas de gestão técnica junto a inúmeras pequenas minerações no estado de SP, em outros estados e em outros países. Entre os diversos projetos ativos, destacam-se os trabalhos de eficiência operacional junto à Mina Experimental localizada em Taubaté-SP (focado no aproveitamento de agregados minerais), o apoio técnico para os garimpeiros do Rio Madeira (projeto de elevado sucesso que trouxe resultados expressivos em relação à política mineral do estado de Rondônia) e o apoio técnico aos garimpeiros da região de Portovelo, no Equador (por meio do consórcio financiado pela ONU, que também apoiou as políticas minerais regionais).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em razão do potencial identificado na região o objetivo final é atingir índices de produção em escala industrial que atenda às necessidades do setor fotovoltaico, identifica-se a necessidade de novos estudos e pesquisa geológica para analisar e parametrizar a ocorrência de quartzo em Cristalândia do Tocantins.

Para que a produção não fique limitada a operações somente de garimpo, faz-se necessário investir em pesquisas que sejam transversais ao desenvolvimento sustentável como o direcionamento exato ao corpo mineralizado. A mineração poderá trazer vários benefícios à região a partir da instalação de lavras responsáveis e usinas de beneficiamento de alto padrão industrial que possam atender as necessidades dos futuros leilões nacionais de energia solar.

Neste sentido, além de se configurar como uma fonte limpa de geração de energia, o estudo da pureza e do teor de quartzo em Cristalândia, significa um avanço representativo no que se refere ao desenvolvimento econômico de uma região. A parceria com a COOPERCRISTAL traz a vantagem de se inserir a comunidade como agente promotor de crescimento local.

No que tange a mineração, o consumo de energia tem custos elevados principalmente no processamento dos minerais, a criação de um programa integrado de energia elétrica e painéis solares pode ser uma alternativa viável a ser aplicada, gerando redução do consumo de combustíveis fósseis e obtendo êxito sustentável com suporte tecnológico.

O Brasil apresenta grande potencial para a inserção da energia fotovoltaica na matriz energética e se destaca como setor estratégico, logo a necessidade de pesquisa, desenvolvimento para aplicar políticas que acelerem esse desenvolvimento.

Este mesmo potencial pode ser de suma importância pedagógica, pois significa aproximar as necessidades do mercado para serem incorporadas no ensino e melhorar a formação dos futuros engenheiros de minas, assim como aprimorar as linhas de pesquisas criando condições propícias para a inovação tecnológica, fortalecendo na colaboração.

Os argumentos acima são fortalecidos pela riqueza mineral do estado do Tocantins, há ocorrências de inúmeros bens minerais, contudo percebe-se a ausência de um plano de ações e governança para transformar as oportunidades em

realidades empresariais de fato, possibilitando o desenvolvimento do setor e sua profissionalização e gerando o bem-esta a sociedade.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica). São Paulo, 2012. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/>>. Acesso em 02 Set. 2014.
- ARGONZ, Raquel. **Purificação de rejeitos de lascas de quartzo das indústrias de silício**. 2001. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, São Paulo
- ASIF. Asociación de La Industria Fotovoltaica. Solar Generation V – 2008. **Electricidad Solar para Más de Mil Millones de Personas y dos Millones de Puestos de Trabajo para el Año 2020**. 2008a. TREBLE, F.C. Generating electricity from the sun. Oxford: Pergamon. 293 p. 1991.
- BARBOSA, M. I. M.; PORPHÍRIO, N.H. (1995). **Caracterização Tecnológica de Lascas de Quartzo**. CNPq/CETEM, Rio de Janeiro.
- BRASIL. S., C.; Q., E.; C., C. (1997). **Principais Depósitos Minerais do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1997, p 316-318.
- CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. 2006. **Energia Solar: Princípios e Aplicações**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 05 Out. 2014.
- CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. 2014. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 05 Out. 2014.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Quartzo. Sumário Mineral 2013** - Vol. 33. DNPM, Brasília. 137 disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2013>>. Acesso 25 Set.2015
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Quartzo. Sumário Mineral 2014** - Vol. 34. DNPM, Brasília. 141. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso 25 Set.2015
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 05 Out. 2014.
- FERREIRA, Maria Julita Guerra. **Inserção Da Energia Solar Fotovoltaica No Brasil**. 1993. Dissertação (Mestrado em Energia) - Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-05122011-141720/>>. Acesso em: 02 Out. 2014.
- GHENSEV, Almir. **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. 2006. 154 f. Monografia (Pós-graduação Latu Sensu em Fontes Alternativas de

Energia), Departamento de Departamento de Pesquisa da Universidade Federal de Lavras, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2006.

HUMMEL, D. **Defeitos e impurezas em quartzo e purificação por processos de lixiviação**. 1989. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, São Paulo.

LUZ, A.B.; BRAZ, E. (2000). **Quartzo - Série Rochas e Minerais Industriais 2**. CETEM/MCT, Rio de Janeiro.

LUZ, A.B.; LINS, F.F. (2008). **Rochas e Minerais Industriais: Uso e Especificações**. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, pp.681-718.

MARKO, František et al. **Tectonic and fluid inclusion constraints on the origin of quartz veins with giant crystals in the Tocantins structural province (Cristalândia, central Brazil)**. Journal Of South American Earth Sciences 21. Bratislava, p. 239-251. 01 jan. 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Plano Decenal de Expansão de Energia PDE 2023**. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/>. Acesso em: 05 Out. 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Relatório Técnico 37. Perfil do Quartzo**. Disponível em < <http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 05 Out. 2014.

MORI, V.; Santos, R. L. C. ; Sobral, L. G. S, V. **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais**. Série Tecnologia Mineral, 41, CETEM/MCT, Rio de Janeiro RJ, Brasil, 2007.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 276 p. Disponível em: <<https://www.feevale.br/cultura/editora-feevale/metodologia-do-trabalho-cientifico---2-edicao>>. Acesso em: 28 set. 2015.

PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: **RESEARCH AND APPLICATIONS**. Short Communication: Solar Cell Efficiency Tables (Version 32). Jun, 2008.

SAUAIA, Rodrigo Lopes. **Avaliação econômica, financeira e de emprego da energia solar**. Palmas: I Seminário Internacional Palmas Solar, 2015. 44 slides, color. Disponível em: <[http://palmassolar.palmas.to.gov.br/media/palestra\\_pdf/27.pdf](http://palmassolar.palmas.to.gov.br/media/palestra_pdf/27.pdf)>. Acesso em: 01 jul. 2015.

SERODIO, Leonardo Moutinho. **Estado da Arte da obtenção de Silício Grau Solar**. 2009. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em:

<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003525.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2015.

TAKATA, Marcio. **Experiência da Enova Solar com a formação de recursos humanos no Brasil**. Palmas: I Seminário Internacional Palmas Solar, 2015. 47 slides, color. Disponível em: <[http://palmassolar.palmas.to.gov.br/media/palestra\\_pdf/33.pdf](http://palmassolar.palmas.to.gov.br/media/palestra_pdf/33.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2015.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Aspectos tecnológicos e operacionais da geração fotovoltaica**. Curitiba, 2014. 49 slides. Conferência Internacional Smart Energy Paraná. Disponível em: <[http://smartenergy.org.br/2014/images/palestras/08maio\\_manha/02\\_JAIR\\_SmartEnergy.pdf](http://smartenergy.org.br/2014/images/palestras/08maio_manha/02_JAIR_SmartEnergy.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2015.

VARELLA, Fabiana Karla de O. M. **Estimativa do Índice de Nacionalização dos Sistemas Fotovoltaicos no Brasil**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 126 p. Tese (Doutorado).

VIANA, Trajano de Souza. Avaliação da irradiação solar direta e do potencial da geração solar fotovoltaica com sistemas com concentração no Brasil. 2010. Tese (Doutorado em Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina.

WWF. **Desafios e Oportunidades para a energia solar fotovoltaica no Brasil: recomendações para políticas públicas**. 2015. Desenvolvido em parceria com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) e elaborado pela LCA Consultores. Disponível em: <[http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/15\\_6\\_2015\\_wwf\\_energ\\_solar\\_final\\_web\\_3.pdf](http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/15_6_2015_wwf_energ_solar_final_web_3.pdf)>. Acesso em: 13 set. 2015.

YIN, Roberto, K. **Estudo de Caso – Planejamento e Métodos**. 4ª. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2010, 248p.