

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - CENTRO  
CURSO TÉCNICO EM QUÍMICA

ALEX BASSANI  
ANA BEATRIZ GOETEN  
CAMILA LAÍS MOHR  
ELISA DOS SANTOS CALADO SANTANA  
FÁBIO GESSER RODRIGUES  
FLÁVIA LUÍSA DE OLIVEIRA  
STEFANY CRISTINE VENSKE

**RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: A BUSCA POR UM PROCESSO  
OTIMIZADO PARA O APROVEITAMENTO DO SILÍCIO E DEMAIS CONSTITUINTES  
DO MÓDULO SOLAR**

JARAGUÁ DO SUL  
2023

ALEX BASSANI  
ANA BEATRIZ GOETEN  
CAMILA LAÍS MOHR  
ELISA DOS SANTOS CALADO SANTANA  
FÁBIO GESSER RODRIGUES  
FLÁVIA LUÍSA DE OLIVEIRA  
STEFANY CRISTINE VENSKE

**RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: A BUSCA POR UM PROCESSO  
OTIMIZADO PARA O APROVEITAMENTO DO SILÍCIO E DEMAIS CONSTITUINTES  
DO MÓDULO SOLAR**

Projeto de pesquisa do Programa Conectando Saberes  
apresentado ao Instituto Federal de Santa Catarina -  
Campus Jaraguá do Sul - Centro como parte  
complementar à matriz Curricular do Curso Técnico em  
Química.

Orientador: Prof. Dr.Jaison Vieira da Maia  
Coordenador: Prof. Dr.Jaison Vieira da Maia

Jaraguá do Sul

2023

## SUMÁRIO

<b>1 TEMA.....</b>	<b>4</b>
<b>2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....</b>	<b>4</b>
<b>3 PROBLEMA DE PESQUISA.....</b>	<b>4</b>
<b>4 HIPÓTESES.....</b>	<b>4</b>
<b>5 OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
5.1 OBJETIVO GERAL.....	5
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>6 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>5</b>
<b>7 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>6</b>
7.1 O SILÍCIO COMO MATERIAL SEMICONDUTOR.....	7
7.1.1 Condutores.....	7
7.1.2 Isolantes.....	7
7.1.3 Semicondutores.....	8
7.1.3.1 Dopagem.....	9
7.1.3.2 Junção pn.....	10
7.2 FUNCIONAMENTO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	11
7.3 MÓDULOS SOLARES MONO E POLICRISTALINOS.....	14
7.4 SISTEMAS DE GERAÇÃO ON-GRID E OFF-GRID.....	14
7.5 INVERSOR UTILIZADO EM PAINEL FOTOVOLTAICO.....	15
7.6 PRINCIPAL LEGISLAÇÃO SOBRE A GERAÇÃO PRÓPRIA DE ENERGIA.....	15
7.7 RECICLAGEM DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	17
<b>8 METODOLOGIA.....</b>	<b>18</b>
<b>9 CRONOGRAMAS.....</b>	<b>19</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>21</b>

## 1 TEMA

Reciclagem de módulos fotovoltaicos.

## 2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este projeto buscará estabelecer um processo de reciclagem para módulos solares de geração de energia que estejam danificados, considerando módulos com defeitos de fabricação, dano no transporte ou instalação, e também, o que apresentou algum defeito permanente durante o uso. Ou seja, a proposta da pesquisa se delimita a buscar uma forma adequada de descarte de módulos fotovoltaicos que apresentem algum defeito irreversível.

## 3 PROBLEMA DE PESQUISA

Qual o processo de reciclagem de módulos fotovoltaicos danificados que se mostra mais viável e atrativo, ambiental e economicamente, considerando avarias desde a cadeia de produção, transporte e até o final de sua vida útil?

## 4 HIPÓTESES

- Há viabilidade no processo de reciclagem de módulos fotovoltaicos danificados, considerando o aproveitamento parcial dos elementos, em especial os que são possíveis de separar mecanicamente;
- A reciclagem por meio de solução ácida é a mais eficaz, e variáveis como granulometria do material triturado, concentração do ácido, temperatura e agitação são decisivos para eficiência do processo.
- A separação do silício se mostra possível, porém os custos envolvidos ainda dificultam a adoção em escala industrial.

## 5 OBJETIVOS

### 5.1 OBJETIVO GERAL

Estabelecer um processo otimizado de reciclagem dos módulos fotovoltaicos danificados, considerando especialmente aspectos ambientais e econômicos.

### 5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar os diferentes materiais presentes nos módulos fotovoltaicos danificados, utilizando técnicas físicas (mecânicas) de separação;
- Analisar o potencial econômico dos materiais separados manualmente;
- Testar métodos de separação química do silício presente nos módulos fotovoltaicos;
- Instituir os parâmetros de processo otimizado de uma rota de separação química do silício.

## 6 JUSTIFICATIVA

Quando pensamos em tecnologia e no seu avanço nas últimas décadas, a importância dos componentes eletrônicos, e por assim dizer, do uso do silício como material semicondutor é inquestionável. Mas assim como o desenvolvimento da eletrônica trouxe avanço nas mais diversas áreas, como consequência, gerou-se um problema de dimensões globais, que é a destinação adequada desses equipamentos após sua vida útil.

Todos os equipamentos eletrônicos que não tem mais utilidade, viram o que conhecemos como lixo eletrônico. Curiosamente, um estudo realizado pelo Radar Pesquisas constatou que a maioria da população brasileira sabe do que se trata o lixo eletrônico, porém, uma parte da população equivocadamente acredita que o lixo eletrônico está associado a *spam*, *e-mails*, fotos e arquivos (TOKARNIA, 2021). De acordo com Brasil (2010 *apud* FAITTA; FREIRE; MOI; OLIVEIRA; REZENDE; SOUZA, 2012, p. 39) “O lixo eletrônico

é considerado um resíduo sólido especial de coleta obrigatória [...] pois são constituídos por materiais que possuem metais pesados altamente tóxicos”.

Uma das aplicações de tecnologia que geram lixo eletrônico, e que devem crescer muito nos próximos anos, são os sistemas de geração de energia elétrica por meio energia solar. A exemplo temos os painéis solares, ou melhor, os módulos fotovoltaicos, que segundo Tonholi (2021, p. 39) “[...] mais de 78 milhões de toneladas de equipamentos fotovoltaicos serão acumulados mundialmente até 2050”, e caso descartados incorretamente, podem prejudicar o meio ambiente (TOKARNIA, 2021), poluindo os lençóis freáticos (BEZERRA; CAVALHEIRO; PISANO; TANAUE, 2015).

Diante desse cenário, este projeto visa estudar e analisar as possibilidades de reciclagem dos componentes dos módulos fotovoltaicos.

Para tanto, lançamos mão de três conceitos fundamentais na discussão sobre sustentabilidade: os 3 R’s.

De acordo com Mafaldo (2010, p. 25), os 3 R’s (reduzir, reciclar e reutilizar) “têm como principal objetivo a diminuição da produção de resíduos sólidos e a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente”.

Reduzir significa diminuir o consumo de materiais procedentes de recursos naturais não renováveis (MAFALDO, 2010), podemos usar como exemplo o uso de *ecobags*, pois essa prática substitui o uso de várias sacolas plásticas. Reutilizar é o ato de lavar e usar novamente o material ao invés de jogá-lo no lixo, nessa prática o material pode ser usado para a mesma finalidade ou para qualquer outra.

Reciclar, que foi no que focamos o nosso projeto, consiste na transformação do material tanto de forma física como química, assim esse produto pode ser usado na forma original ou como matéria prima para outros materiais (MAFALDO, 2010).

## 7 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será apresentado as características do silício, que é um material semicondutor vital para construção dos módulos fotovoltaicos, assim como, se discorrerá sobre os módulos, suas características e funcionamento, e por fim, um apanhado sobre estudos relacionados ao tema deste projeto de pesquisa.

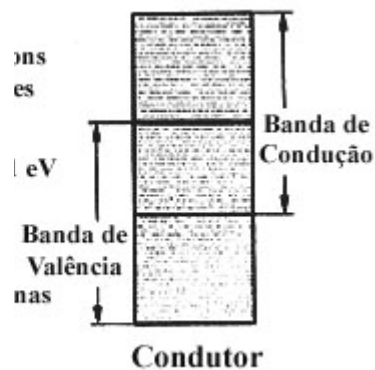
## 7.1 O SILÍCIO COMO MATERIAL SEMICONDUTOR

Para definir o que é um material semicondutor inicialmente precisa se estabelecer as diferenças entre material condutor, isolante e semicondutor, como apresentado a seguir.

### 7.1.1 Condutores

Metais são conhecidos por serem bons condutores pois possuem o que chamamos de mar de elétrons, ou seja, as cargas elétricas que estão mais afastadas do núcleo se movimentam de maneira “livre” na superfície dos materiais (Carneiro, 2010). A teoria das bandas explica que esses materiais têm seu último orbital incompleto ou completo com sobreposição no próximo orbital (Figura 1) e os elétrons de valência trocam facilmente de lugar com elétrons de outra molécula semelhante (Swart, 2011).

**Figura 1** - Representação da teoria das bandas para os materiais condutores.

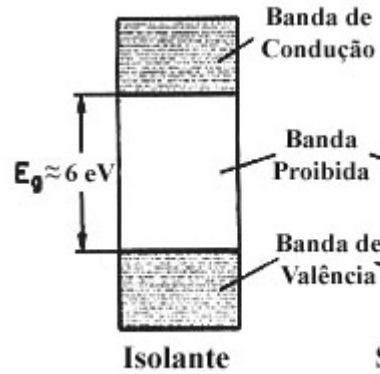


Fonte: Camargo, 2005.

### 7.1.2 Isolantes

São materiais que possuem suas cargas elétricas fixas, ou seja, os elétrons estão ligados ao núcleo do material (Carneiro, 2010). De acordo com a teoria das bandas, um material isolante deve ter “[...] sua última banda, chamada de valência, totalmente preenchida, sem sobreposição com a banda de energia seguinte” (SWART, 2011, p. 6). O espaço entre a banda de condução e a banda de valência é grande, como é ilustrado na Figura 2.

**Figura 2** - Representação da teoria das bandas para os materiais isolantes.



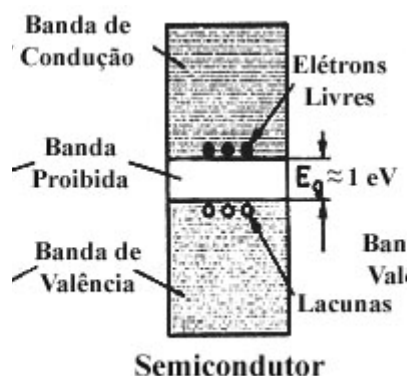
Fonte: Camargo, 2005.

### 7.1.3 Semicondutores

Esses materiais são “intermediários”, eles não são bons isolantes nem bons condutores (Carneiro, 2010), pois possuem quatro elétrons na camada de valência, ou seja, a metade do número de elétrons que satisfaz a teoria do octeto<sup>1</sup>. Os elétrons de suas moléculas se ligam através de ligações covalentes e ficam estáveis, porém com o fornecimento de uma quantidade de energia maior que a energia do *band gap* (ou banda proibida) os elétrons que estão na banda de valência passam para a banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência, conforme Figura 3) (Swart, 2011).

Todos os conceitos relativos a este material estão baseados no movimento das cargas, que por sua vez se relaciona com as ligações existentes nos materiais e só ocorre na presença de um campo elétrico, ou seja, quando há diferença de potencial elétrico (UNIVESP, 2017).

**Figura 3** - Representação da teoria das bandas para os materiais semicondutores.



Fonte: Camargo, 2005.

<sup>1</sup> De acordo com a teoria do octeto, os átomos buscam a configuração eletrônica de um gás nobre, ou seja, com oito elétrons na camada de valência, atingindo o estado de menor energia.

Podemos observar na Figura 3, a presença das lacunas na banda de valência, esta irá atrair um elétron, o que formará outra lacuna. Isso se repete incontáveis vezes, dando ao semicondutor a habilidade de conduzir correntes elétricas (Carneiro, 2010).

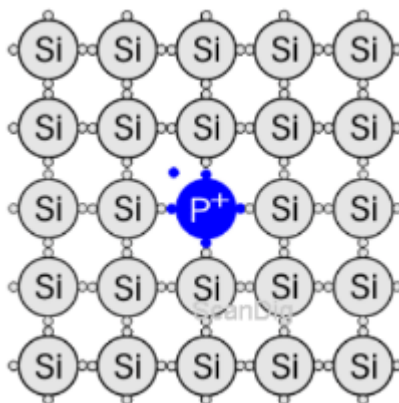
### 7.1.3.1 Dopagem

Em concordância com Carneiro (2010, p. 9), “O processo de dopagem consiste na inserção de impurezas, ou seja, a introdução de átomos de um outro elemento químico na estrutura cristalina do silício”, a inserção em questão se caracteriza como substituição.

A dopagem pode ser tipo n (negativo) que ocorre com átomos pentavalentes (possuindo quatro elétrons na camada de valência), como o de Fósforo (P) (Carneiro 2010). Nesse caso os quatro elétrons de valência do Silício fazem ligação normalmente e um único elétron de Fósforo fica sem fazer ligação, caracterizando um excesso de elétrons (Figura 4). A partir disso, são criadas camadas cheias abaixo da zona de condução, as cargas nessa região podem receber energia para chegar até a zona de condução sem muita dificuldade (PORTNOI, 2002).

Quando são adicionados vários átomos destas impurezas, temos elétrons livres, fazendo com que haja condutividade quando aplicado uma diferença de potencial.

**Figura 4** - Dopagem tipo n com Fósforo numa estrutura de Silício.

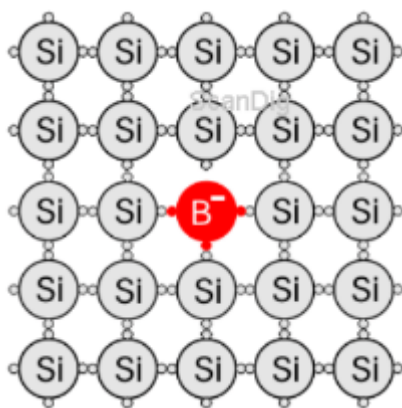


**Fonte:** Remes, 2013.

Além do tipo n, existe a dopagem tipo p (positivo), que acontece com átomos trivalentes (com três elétrons na camada de valência, como Boro (B)) onde três ligações são feitas e ainda há uma lacuna (Figura 5), fazendo com que a estrutura seja carente de elétrons (Carneiro, 2010).

Na presença de várias lacunas, os elétrons podem também se mover, estando condicionados a ocuparem apenas estes espaços.

**Figura 5** - Dopagem tipo p com Boro numa estrutura de Silício.



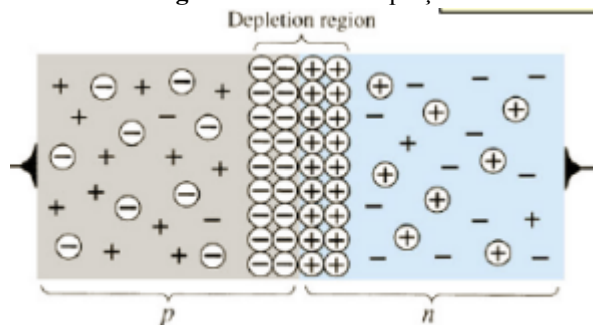
Fonte: Remes, 2013.

### 7.1.3.2 Junção pn

Na junção pn, “que nada mais é do que a transição entre as regiões p e n em um cristal semiconductor” (CAMARGO, 2005, p. 40) está a maior aplicação dos semicondutores, uma vez que dopagens tipo n e tipo p isoladas são neutras (Nascimento, 2004).

Um material com excesso de elétrons é justaposto a um com carência de elétrons, essa junção dá origem ao que chamamos de depleção (Figura 6). Depleção é a região nas proximidades da junção em ambos os lados, onde os elétrons e as lacunas se recombinam, gerando um campo elétrico (CAMARGO, 2005).

**Figura 6** - Zona de depleção.

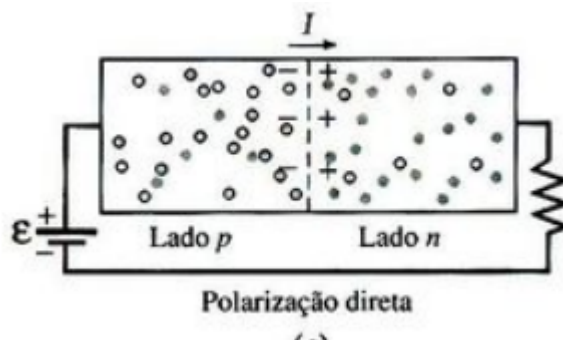


Fonte: Petry, 2013.

Quando o polo positivo é conectado a uma fonte positiva e o negativo a uma fonte negativa, as cargas dos polos e das fontes se repelem. Isso faz com que a zona de depleção diminua a ponto de haver condução de energia, podendo ser maior ou menor dependendo da tensão aplicada pela fonte (WENDLING, 2011), a isso damos o nome polarização direta, que pode ser observada na Figura 7. Já na situação contrária, ou seja, quando o polo negativo é conectado a uma fonte positiva e o polo positivo é conectado a uma fonte negativa, as cargas das fontes e dos polos se atraem, aumentando a zona de depleção e tornando praticamente

impossível a condução de energia (WENDLING, 2011), isso recebe o nome de polarização inversa ou reversa (Figura 8).

**Figura 7 - Polarização direta.**



Fonte: Kerschbaumer, 2019..

**Figura 8 - Polarização inversa ou reversa.**



Fonte: Kerschbaumer, 2019.

## 7.2 FUNCIONAMENTO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

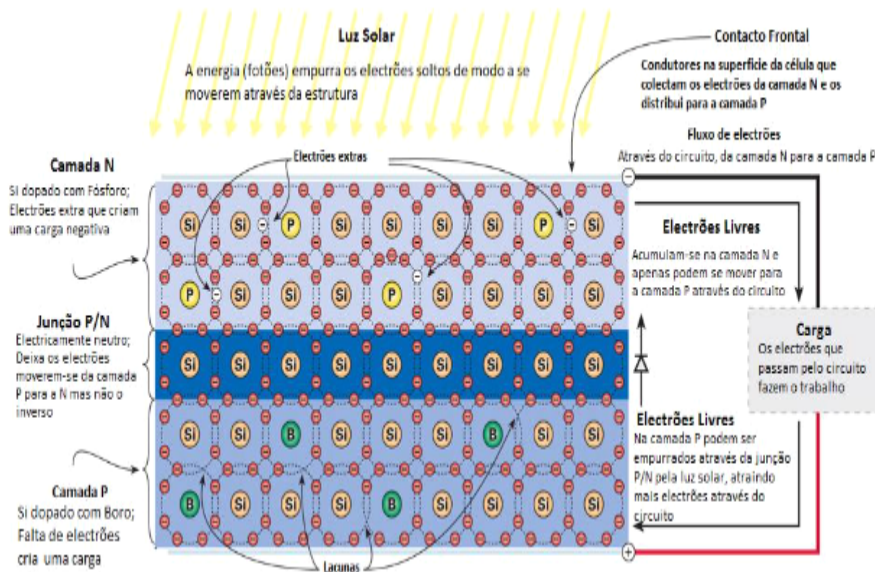
Módulo fotovoltaico é um termo formal para placa ou painel solar, ele é composto de 36 a 72 células solares de silício, e a sua função é a captação da luz solar, a fim de converter a luz do sol em energia elétrica. Essa conversão é realizada através do efeito fotovoltaico observado por Edmond Bequerel em 1839.

Ele observou que existia uma diferença de potencial nas estruturas semicondutoras, quando uma luz atingia ela. E em 1956 foram construídas as primeiras células fotovoltaicas industriais. Essas células fotovoltaicas são produzidas com materiais que possuem características de condutor e isolante, o principal componente de um módulo fotovoltaico é o silício. Ele se apresenta majoritariamente como areia, e através de processos o silício é obtido puro, porém esse silício puro não possui elétrons livres, então ele acaba sendo um mau condutor elétrico (NASCIMENTO, 2004, p. 9,12).

Para alterar isto acrescentam-se porcentagens de outros elementos. A dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores

de carga negativa (silício tipo N), (NASCIMENTO, 2004, p. 12). Conforme a Figura 9, pode-se observar a anatomia de uma célula fotovoltaica e seu funcionamento.

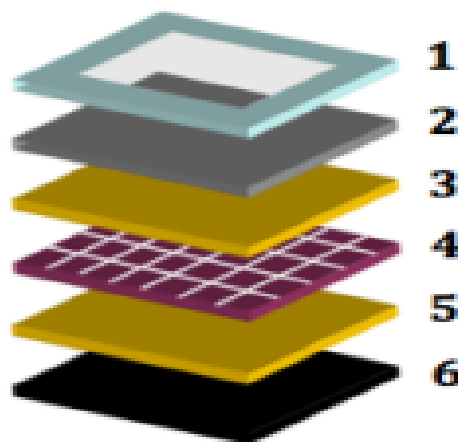
**Figura 9 - Anatomia de uma célula.**



**Fonte:** Moreira, 2016.

O módulo solar é composto por elementos que promovem uma boa estabilidade. Na parte exterior temos o caixilho, em alumínio coberto com uma fina camada de óxido, ele auxilia na rigidez mecânica. Na face superior, que deve ficar voltada para o sol, temos o vidro temperado, ele permite a entrada da luz e protege as células fotovoltaicas de colisões. No meio, formando um sanduíche, temos as células fotovoltaicas (conversor de energia solar em elétrica). E por fim, na parte inferior tem-se um isolante protegendo de danos e umidade, como pode ser observado na Figura 10.

**Figura 10 - Estrutura de um módulo fotovoltaico.**



**Fonte:** Carneiro, 2010.

**Tabela 1:** Descrição da figura 10.

1- Caixilho
2- Vidro temperado
3- Material isolante e protetivo
4- Células fotovoltaicas
5- Material isolante e protetivo
6- Isolante

No módulo fotovoltaico existem alguns processos para que ocorra a conversão de energia solar em elétrica. No primeiro instante, o processo ocorre no módulo solar, onde a luz solar é absorvida pelas células fotovoltaicas, essa energia transferida para os elétrons que estão dentro do painel, geram a movimentação dos elétrons, ou seja, provocam uma corrente elétrica.

Os módulos solares produzem energia elétrica em corrente contínua (CC). Como a energia utilizada em nossas casas é corrente alternada (AC), instala-se nesses sistemas o inversor que é o responsável por converter a energia de CC para AC. E assim, a distribuição da energia transformada pelo inversor é operada por meio do quadro de disjuntores, sendo distribuída para a residência. O medidor de energia bidirecional mede a energia da distribuidora consumida e a energia elétrica gerada pelos módulos solares que não foi utilizada na residência, ou seja, a excedente. O “excesso” de energia vai para a rede distribuidora gerando créditos, e esse crédito pode ser utilizado em outros momentos como à noite, em períodos chuvosos e nublados.

Em relação a isso, as características das células e o seu comportamento irão se refletir nas características elétricas do módulo, como por exemplo na sua eficiência, durabilidade, etc. Os módulos têm como principais características o seguinte:

Tensão de Circuito Aberto (Voc)

Corrente de Curto

Circuito (Isc)

Potência Máxima (Pm)

Tensão de Potência Máxima (Vmp)

Corrente de Potência Máxima (Imp)

As condições de referência (CTS) para se obter as características dos módulos são definidas para radiação de 1000W/m<sup>2</sup> (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de 25°C.(MOREIRA, 2016).

E assim, o desempenho de um módulo fotovoltaico depende principalmente da intensidade e da direção da luz solar, da temperatura e da qualidade dos materiais utilizados. As células fotovoltaicas perdem rendimento com o passar do tempo, estima-se por fabricantes de módulos fotovoltaicos que a perda de rendimento em um painel fotovoltaico é de 0,8% ao ano. (ROSA; MOURA; ALMEIDA; COSTA, 2022).

### 7.3 MÓDULOS SOLARES MONO E POLICRISTALINOS

De acordo com Prange (2021) células fotovoltaicas têm como material principal o silício, sendo que 84% do mercado usa o silício cristalino (c-Si) que se ramifica em monocristalino ou policristalino.

Ambos os tipos de módulos solares são fundidos e solidificados em blocos chamados de lingotes, a diferença é que o monocristalino é homogêneo e tem um aspecto visual mais brilhante quando comparado ao policristalino que tem um aspecto visual rugoso por conta das diferentes orientações e tamanhos dos pedaços de cristais (PRANGE, 2021).

Assim, podemos destacar que a principal diferença entre os dois tipos de módulos solares é que o painel monocristalino é formado por uma única fatia de cristal de silício e o policristalino é formado por vários pedaços de cristais de silício (HEPEL, 2021).

Apesar de serem mais caros por conta da pureza, os módulos solares monocristalinos são de 15% e 22% mais eficientes que os policristalinos, pois como as células são “inteiras” os elétrons possuem mais espaço para circulação, e assim, gerar energia. Ao contrário dos policristalinos, em que os elétrons se movimentam nos pedaços de cristal de silício (HEPEL, 2021).

Além da eficiência e preço, ambos os tipos de módulos solares também possuem diferença na aparência, os policristalinos são mais claros, e os monocristalinos são mais escuros devido a pureza do silício e também considerados mais bonitos (ECOA, 2020).

### 7.4 SISTEMAS DE GERAÇÃO ON-GRID E OFF-GRID

O sistema ON-GRID é uma rede complementar ao sistema elétrico que é utilizado em locais que já dispõem de energia elétrica, ou seja, são conectados à rede elétrica do local. O próprio nome já sugere, “on grid” = “na rede”. Esse sistema não armazena energia. Portanto, a

energia gerada que não é utilizada pelo consumidor/gerador é entregue diretamente à rede elétrica. (ALVES, 2019)

Já o OFF-GRID produz energia através da radiação solar de forma autônoma. Estes sistemas não são conectados à rede elétrica, trabalham sem estar em paralelo com a rede convencional. Já que não dependem da rede, eles possuem um sistema de armazenamento de energia, que ocorre por meio da utilização de baterias. (ALVES, 2019)

## 7.5 INVERSOR UTILIZADO EM PAINEL FOTOVOLTAICO

Os inversores com diferentes modelos contém amplas formas de serem instalados, mas com uma finalidade essencial para o funcionamento do sistema fotovoltaico, sendo considerado o "cérebro" do sistema, o inversor contém tecnologia microprocessada e alguns componentes eletrônicos para o seu funcionamento.

Sobre a sua finalidade, o inversor em sua principal função tem o papel de transformar correntes contínuas (vinda dos painéis fotovoltaicos) em correntes alternadas com padrões definidos para o uso residencial ou industrial, conforme já citado (RAMPINELLI, 2010).

## 7.6 PRINCIPAL LEGISLAÇÃO SOBRE A GERAÇÃO PRÓPRIA DE ENERGIA

A lei 2427/96 afirma que “a ANEEL é responsável pela regulamentação e fiscalização de qualquer produção, transmissão, distribuição e comercialização do insumo” (MIRANDA, 2022). A lei foi criada em 1996, e desde então, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina as condições para o uso de qualquer fonte de energia elétrica do país. A respeito da permissão para geração de energia, em 2012, a ANEEL desenvolveu uma medida que possibilitou à população gerar sua própria energia. Trata-se da Resolução Normativa 482 (REN-482). “A partir dessa legislação, as concessionárias de geração de energia elétrica foram obrigadas a desenvolver mecanismos que permitam ao consumidor final gerar a sua própria energia, seja em suas residências ou empresas.” (MIRANDA, 2022). Em outros termos, a produção em excesso é trocada por benefícios na conta de luz. No entanto, em 2015, a ANEEL criou outra medida a respeito desses créditos energéticos, a REN-687. Na resolução normativa 482, o tempo para fazer o uso desses créditos era de, no máximo, três anos. Já a resolução 687 tem um prazo maior de até cinco anos.

No dia 6 de janeiro de 2022, foi sancionada a Lei nº 14.300/2022, que se tornou o novo Marco Legal Solar no Brasil. A lei traz algumas mudanças, segundo Miranda (2022), tais como:

- Aquele que já possui o sistema solar instalado e quem instalar o novo sistema solar até final deste ano (leia-se 2022), terá os créditos de energia sem alterações até final de 2045 (1 kWh de crédito para cada 1 kWh injetado na rede);
- Maior segurança jurídica, Resolução Normativa 482/12 poderia ser alterada a qualquer momento pela Aneel;
- Permissão para instalar sistemas híbridos com baterias de forma legal, item ainda em análise para regulação pela ANEEL;
- Permissão para venda dos créditos de energia para concessionária, item ainda em análise para regulação pela ANEEL;
- Não haverá mais cobrança em duplicidade da taxa mínima;
- Maior possibilidade de criação de usinas solares compartilhadas;
- Mais facilidade para distribuir créditos de energia, o prazo para alterações reduziu de 60 para 30 dias;
- Permite o abatimento de créditos entre concessionárias e permissionárias de energia;
- Benefícios ambientais dos sistemas solares serão valorados e remunerados, a partir de março de 2022.

Para as produções de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras, ou seja, as microgerações (geração menor ou igual a 75 kW de potência) e minigerações (entre 75 kW e 5 MW de potência), existem 3 sistemas de compensação, são eles:

- Geração compartilhada: caracterizado por vários consumidores dentro da mesma área de concessão que possua a geração em um local diferente das unidades consumidoras. É composta por pessoa física ou jurídica e pode ser feita através de cooperativas ou consórcio.
- Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (condomínios): Diversas unidades consumidoras da mesma área de concessão que possua a sua geração no mesmo local das unidades consumidoras.
- Autoconsumo remoto: Unidades consumidoras de mesma titularidade de pessoa jurídica ou pessoa física cuja geração esteja em um local distinto da unidade consumidora.

Além disso, os impostos também estão presentes, tais como o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) e o Programa de Integração Social e o Programa de Formação de Patrimônio do Servidor Público ( PIS/PASEP). Sendo cobrados somente sobre o consumo excedente ou sobre toda a energia consumida.

## 7.7 RECICLAGEM DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

O principal desafio do processo de reciclagem de módulos fotovoltaicos é separar os materiais de maneira que eles possam ser reutilizados, preferencialmente, na sua funcionalidade de origem. Dentro das possibilidades de reciclagem, existem as separações físicas, que visam desmembrar os materiais sem que haja alteração na composição química do material e focando em suas propriedades físicas, ou seja, tamanho, densidade, ponto de fusão e entre outros. Existem também as separações químicas, que utilizam a modificação da composição química do material para separá-lo, e geralmente são usadas quando os materiais não podem ser separados pelo meio físico.

O método físico relevante para o projeto é, de forma geral, o método de catação, onde os objetos são separados manualmente, permitindo que seja identificado materiais específicos.

Já sobre os métodos químicos foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os métodos já utilizados, conforme a Tabela 2.

**Tabela 2** - Revisão bibliográfica sobre os métodos químicos de reciclagem dos painéis fotovoltaicos.

Autor	Técnica	Tratamento
FRISSON, 2000	A pirólise: permitiu separar 80% das células e quase 100% das folhas de vidro.	Químico: Processos baseados em pirólise
T. DOI, 2001	A célula de silício foi separada sem qualquer dano por dissolução em tricloroetileno a 80 ° C durante 10 dias.	Químico: dissolução em solventes orgânicos.
BOMBACH, 2006	O processo alcançou um rendimento de separação de cerca de 76% das células, adequado para a reutilização.	Físico e Químico: Processo térmico e ácido
GRANATA, 2014	85% do cobre e 62% do silício foram separados. O processo permitiu recuperar até 86% do silício com pureza muito alta.	Químico e físico: Processo com aquecimento, seguido por processos químicos com ácidos e álcool.

**Fonte:** Tecnologias Para Reciclagem de Sistemas Fotovoltaicos: Impactos Ambientais, 2018.

Após 2014 não foram encontrados estudos práticos com métodos diferentes sobre a reciclagem dos painéis, apenas outras revisões sobre métodos já praticados. Foi feita uma

revisão sobre outros processos sem rendimentos constatados (Tabela 3) para uma contingência estratégica.

**Tabela 3** - Tecnologias de reciclagem para módulos e-Si encontradas na literatura.

<b>Tecnologia / Processo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Dissolução em solvente orgânico	Fácil remoção do EVA Menor dano às células FV Recuperação do vidro	Impacto devido às emissões e resíduos ao meio
Solvente orgânico e irradiação ultrassônica	Fácil remoção do EVA Mais eficiente que a dissolução	Impacto devido às emissões e resíduos do meio Custos dos equipamentos
Calor / Eletrotérmico	Fácil remoção do vidro	Processo lento
Separação mecânica	Menor dano às células FV Recuperação do vidro	Requer outro processo para completa remoção do EVA Danos às células FV
Pirólise	Recuperação de materiais (80% do sanduiche e de 100% do vidro) Eficiência e custo para escala em processo industrial	Danos às células
Dissolução em solvente (Ácido nítrico)	Remoção completa do EVA e de metais dos contatos elétricos do sanduiche Possibilidade de recuperação da célula FV intacta	Causa danos às células FV Geração de emissões e resíduos prejudiciais ao meio
Desintegração física	Capacidade de tratar os resíduos	Requer outro processo para completa remoção do EVA Geração de resíduos com metais pesados Danos às células FV
Mecânico (seco e úmido)	Minimiza os impactos causados nos processos químicos Viabilidade dos equipamentos Baixo consumo de energia	Baixa recuperação de materiais raros
Tratamento térmico (calor em duas etapas)	Completa remoção do EVA Possível recuperação da célula FV intacta	Geração de emissões prejudiciais ao meio Alto consumo de energia
Solução química	Recuperação de metais com elevado grau de pureza Processo simples e eficiente	Uso de soluções químicas

Fonte: Scolla, 2020 apud Oliveira, 2021, p. 54.

## 8 METODOLOGIA

O estudo se caracteriza como sendo quantitativo e objetiva encontrar um processo viável e otimizado por meio de pesquisas bibliográficas e experimentos para a reciclagem de módulos fotovoltaicos.

O material que iremos utilizar corresponde a um módulo fotovoltaico que foi danificado por impacto mecânico, e o mesmo foi doado por uma empresa do ramo de energia solar, já estando a disposição no laboratório do IFSC câmpus Jaraguá do Sul - Centro.

De acordo com Bang (2018), podemos separar em 3 estágios:

1. Desmembramento dos materiais por processo manual.

2. Separação dos materiais por processos físicos.
3. Refinamento dos materiais por processos químicos.

Mais especificamente, o primeiro procedimento a ser executado consiste na separação por meio da manual, desmembrando individualmente cada peça/componente segundo seus materiais de fabricação.

Já o segundo procedimento, consiste em separar os elementos que fazem parte do mesmo componente, e que não foi possível a separação manual, como no caso das placas de silício fixadas à placa isolante. Nesse caso a separação por abrasão, por exemplo, o esmerilhamento pode ser usado, assim como outras formas ainda a serem identificadas no momento dos experimentos, podem ser utilizadas. Nesta etapa ainda, o material separado poderá ser triturado, se confirmada a necessidade.

Por fim, o terceiro procedimento, será, se possível, a separação química do material fragmentado/triturado. Tal separação poderá ser feita através de solventes ácidos, fazendo também as extrações líquido-líquido, troca iônica e os processos redox (LI, 2023). Métodos esses a serem melhor avaliados no início da execução do projeto.

Tendo os materiais devidamente separados, os mesmos serão quantificados, e o potencial econômico será avaliado.

## 9 CRONOGRAMAS

**Tabela 3-** Cronograma 2023.2.

Etapas	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Processos de separação física	X				
Quantificação do que foi separado fisicamente	X				
Tabulação e análise dos dados obtidos na separação física		X			
Determinação bibliográfica dos métodos de separação química mais viáveis	X	X			
Ensaio iniciais de separação química			X	X	
Escrita e apresentação do relatório parcial			X	X	X

**Fonte:** Elaborado pelos autores, 2023.

**Tabela 4 - Cronograma 2024.1**

Etapas		Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.
Processos de separação química			X	X				
Quantificação do que foi separado quimicamente			X	X				
Tabulação e análise dos dados obtidos na separação química			X	X				
Escrita do relatório final	X	X	X	X	X	X	X	

**Fonte:** Elaborado pelos autores, 2023.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Marliana de Oliveira Lage. **Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid**. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019. Disponível em:

[https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA\\_EnergiaSolarEstudo.pdf](https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA_EnergiaSolarEstudo.pdf). Acesso em: 13 abr. 2023

BANG, You-Young et al. **Comparative assessment of solar photovoltaic panels based on metal-derived hazardous waste, resource depletion, and toxicity potentials**. International Journal of Green Energy, v. 15, n. 10, p. 550-557, 2018. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15435075.2018.1505618>. Acesso em: 26 de maio de 2023

BEZERRA, Deivid Mendes; CAVALHEIRO, Luana; PISANO, Lilian Cristiane; TANAUE, Ana Claudia Borlina. Lixo Eletrônico: agravos a saúde e ao meio ambiente. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Campo Grande, v. 19, n. 3, p. 130-134, dez. 2015. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/260/26042169006.pdf>. Acesso em: 25 maio 2023.

CAMARGO, Fábio de. **Fatores que influenciam a resolução em energia na espectrometria de partículas alfa com diodos de Si**. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em:

[http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Fabio%20de%20Camargo\\_M.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Fabio%20de%20Camargo_M.pdf). Acesso em: 08 maio 2023.

CARNEIRO, Joaquim. **Semicondutores: modelo matemático da célula fotovoltaica**. 2010. 36 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Física, Universidade do Minho, Azurém, 2010. Disponível em:

[https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16960/1/Semicondutores\\_Modelo%20matem%20da%20c%20a%20lula%20fotovoltaica.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16960/1/Semicondutores_Modelo%20matem%20da%20c%20a%20lula%20fotovoltaica.pdf). Acesso em: 20 maio 2023.

ECO.A. **Tecnologia Cristalina: Entenda as principais características dos painéis monocristalinos e policristalinos**. 2020. Disponível em:

<https://ecoenergias.com.br/tecnologia-cristalina-paineis-fotovoltaicos-monocristalinos-policristalinos/>. Acesso em: 15 maio 2023.

FAITTA, Amanda Cristina Jorge; FREIRE, Fernando Augusto de Lamônica; MOI, Gisele Pedroso; MOI, Paula Cristina Pedroso; OLIVEIRA, Milena Magalhães; REZENDE, Weverson Batista de; SOUZA, Ana Paula Silva de. LIXO ELETRÔNICO: consequências e possíveis soluções. **Connection line**: Revista Eletrônica do UNIVAG, Mato Grosso, n. 7, p. 37-45, 2012. Disponível em:

<https://periodicos.univag.com.br/index.php/CONNECTIONLINE/article/view/105>. Acesso em: 25 maio 2023.

HEPEL. **Painel solar fotovoltaico: monocristalino e policristalino, qual a diferença?** 2021. Disponível em:

<https://hepel.com.br/painel-solar-fotovoltaico-monocristalino-e-policristalino-qual-a-diferenca>



**Módulo Fotovoltaico.** Portal Solar. Disponível em:  
<https://www.portalsolar.com.br/modulo-fotovoltaico>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

PORTNOI, Marcos. **Teoria das bandas.** 2002. Disponível em:  
<https://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/bandtheory.html>. Acesso em:  
08 maio 2023.

PRANGE, Nathanael Günter. **Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Baseados em Silício Monocristalino e Policristalino.** UNISUL. 2021. Disponível em:  
<<https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/13040/1/An%c3%a1lise%20de%20Desempenho%20de%20Sistemas%20Fotovoltaicos%20Baseados%20em%20Sil%c3%adcio%20Monocristalino%20e%20Policristalino.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2023

PUPIN, Priscila Carvalho. **Avaliação dos impactos ambientais da produção de painéis fotovoltaicos através de análise de ciclo de vida.** 2019. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019. Disponível em:  
[https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1939/1/dissertacao\\_2019054.pdf](https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1939/1/dissertacao_2019054.pdf). Acesso em: 09 maio 2023.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** 2010.

REMES, Chrystian Lenon. **Caracterização por simulação numérica de painéis fotovoltaicos e método de rastreamento do máximo ponto de potência baseado em redes neurais artificiais.** 2013. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2013. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/303369695\\_Caracterizacao\\_Por\\_Simulacao\\_Numerica\\_de\\_Paineis\\_Fotovoltaicos\\_e\\_Metodo\\_de\\_Rastreamento\\_do\\_Maximo\\_Ponto\\_de\\_Potencia\\_Baseado\\_em\\_Redes\\_Neurais\\_Artificiais](https://www.researchgate.net/publication/303369695_Caracterizacao_Por_Simulacao_Numerica_de_Paineis_Fotovoltaicos_e_Metodo_de_Rastreamento_do_Maximo_Ponto_de_Potencia_Baseado_em_Redes_Neurais_Artificiais). Acesso em: 25 maio 2023.

ROSA, Ana Luiza da Silva; MOURA, Cássio Nicolini da Silva Moura; DE ALMEIDA, Fábio Pires; COSTA, Lucas André de Souza. **Eficiência Energética em Painéis Fotovoltaicos.** Belo Horizonte: Centro Universitário de Belo Horizonte, 2022. Disponível em:  
[https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/26118/1/TCC%20em%20Efi-ci%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20em%20Placas%20Fotovoltaicas\\_Vers%C3%A3o%20Corrigida.pdf](https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/26118/1/TCC%20em%20Efi-ci%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20em%20Placas%20Fotovoltaicas_Vers%C3%A3o%20Corrigida.pdf). Acesso em: 18 de maio de 2023.

SWART, Jacobus W. **Conceitos Básicos para Semicondutores.** UNICAMP, Campinas, 2011. Disponível em: <https://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap02.pdf>. Acesso em: 08 maio 2023.

TOKARNIA, Mariana. O Brasil é o quinto maior produtor de lixo eletrônico. 2021. Rio de Janeiro: Agência Brasil. Disponível em:  
<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-10/brasil-e-o-quinto-maior-produtor-de-lixo-eletronico>. Acesso em: 09 maio 2023.

TONHOLI, Franciscara. **Ciclo de vida de painéis fotovoltaicos: recuperação do vidro como alternativa ao descarte.** 2021. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021. Disponível em:

<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26281/1/paineisfotovoltaiicosvidrosreciclagem.pdf>. Acesso em: 25 maio 2023.

UNIVESP. Eletromagnetismo - Aula 13 - Condutores, isolantes e semicondutores. YouTube, 06 dez. 2017. Disponível em: <<https://youtu.be/2lCTxwiYlZw>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

WENDLING, Marcelo. **Diodo semicondutor**. 2011. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/2---diodo-semicondutor.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2023.

**TECNOLOGIAS PARA RECICLAGEM DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: IMPACTOS AMBIENTAIS**. Curitiba: Revista, v. 15, n. 7, 15 dez. 2018. Disponível em: [file:///C:/Users/FORMIGARI/Downloads/820-Texto%20do%20artigo-1777-2453-10-20181221%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/FORMIGARI/Downloads/820-Texto%20do%20artigo-1777-2453-10-20181221%20(2).pdf). Acesso em: 24 maio 2023.