

TECNOLOGIAS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS UTILIZADAS EM MÓDULOS COMERCIAIS E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS: UMA REVISÃO

Gabriela Nascimento Pereira – gabriela.pereira@sengisolar.com.br

Gabriel Ugucioni Rocha

Matheus Bisolotti do Carmo

Igor Utzig Picco

Fernando Andrey Bessegatto

Carlos Victor do Rego Brandao

Murilo Bonetto

Sengi Solar, Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento

054. Materiais e tecnologias de células para conversão fotovoltaica

Resumo. Devido ao crescimento do setor fotovoltaico, as tecnologias de células solares de silício cristalino têm evoluído rapidamente nos últimos anos. A busca por materiais e arranjos mais eficientes e confiáveis gera alterações nas tendências de mercado, trazendo células com melhor desempenho. Neste sentido, este trabalho traz uma revisão acerca das principais tecnologias de silício disponíveis no mercado atual (PERC, TOPCon, SHJ e IBC), discutindo características de construção, passivação e dopagem, assim como os principais efeitos de degradação verificados nestes dispositivos. São observadas as principais diferenças de construção entre cada tipo célula e o impacto dessas diferenças no funcionamento e eficiência da célula. Ainda, nota-se que fatores como temperatura do módulo, tipo de encapsulante, exposição à radiação solar, entre outros, contribuem para a deterioração do módulo. Também é realizada uma abordagem breve a respeito da tendência de mercado para as tecnologias fotovoltaicas, verificando-se a direção para a substituição do domínio de células PERC para células TOPCon, além da discussão do potencial brasileiro em torno do setor solar, indicando que o Brasil tem potencial para se tornar fabricante de células solares de silício, sendo apontado como um dos principais produtores mundiais de silício.

Palavras-chave: Tecnologias fotovoltaicas, silício cristalino, Módulos comerciais.

1. INTRODUÇÃO

Em vista do aumento do consumo global de energia, preocupações com o meio ambiente e o esgotamento de combustíveis fósseis, tem se intensificado a procura por fontes de energia alternativas. Neste cenário, a energia fotovoltaica vem sendo vista como uma fonte de grande potencial, fornecendo energia de forma sustentável, possuindo, assim, um papel fundamental no combate a degradações ambientais, como o aquecimento global, mudanças climáticas e poluição do ar (Bórawski, 2023).

As tecnologias fotovoltaicas têm evoluído rapidamente nos últimos anos. Novas tecnologias são investigadas com o intuito de diminuir o custo de produção, atrelado à utilização de menor quantidade de matéria-prima e ao alcance de maior eficiência e estabilidade. Atualmente, o silício é o material semiconductor mais utilizado em aplicações fotovoltaicas, possuindo o domínio de mercado de módulos comerciais, por apresentar algumas vantagens em sua utilização, como: a entrega de longa estabilidade, rápida diminuição de custo de material, alta disponibilidade - sendo um material abundante na crosta terrestre, atoxicidade - exibindo sustentabilidade econômica e ambiental, além de ser uma tecnologia bem estabelecida (Fazal e Rubaiee, 2023; Singh, 2023).

À medida em que a eficiência do silício se aproxima de seu limite teórico, de 29,4%, de acordo com o limite teórico de Shockley-Queisser (SQ) (Shockley e Queisser, 2004), se torna mais difícil eliminar perdas ainda existentes na célula, como perdas de conversão de energia, perdas ópticas e elétricas. Apesar disto, tanto a ciência quanto a indústria buscam medidas de minimizar essas perdas, trazendo algumas soluções, como por exemplo, a introdução de técnicas de passivação, estruturas de contato seletivas e configurações de contatos traseiros, além da investigação de novos materiais que são interessantes para este tipo de aplicação (Ahmad *et al.*, 2023).

Para ser considerada viável de ser implementada comercialmente, a tecnologia fotovoltaica precisa atender alguns critérios, como: apresentar estabilidade, sendo sua durabilidade de longo prazo, baixo custo de produção e alta eficiência (Meng, You e Yang, 2018). No momento, as células de silício cristalino *Passivated Emitter Rear Cell* (PERC) (em português, Emissor Passivado e Contato Traseiro), *Tunnel Oxide Passivated Contact* (TOPcon) (em português, Contato Passivado com Óxido de Efeito Túnel), *Heterojunction Technology* (HJT) (em português, Tecnologia de Heterojunção) e *Interdigitated Back Contact* (IBC) (em português, Contato Traseiro Interdigitado) estão entre as tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado.

A seguir encontra-se uma breve revisão contendo aspectos estruturais, dopagem, passivação, eficiência e problemas de degradação relacionados às arquiteturas PERC, TOPCon, SHJ e IBC. Também serão abordadas as tendências de mercado acerca das tecnologias fotovoltaicas e o potencial brasileiro no setor solar.

2. TECNOLOGIAS DE CÉLULAS UTILIZADAS EM MÓDULOS COMERCIAIS

2.1 PERC

O conceito PERC foi introduzido, primeiramente, em 1983 por Martin Green. No entanto, o primeiro trabalho científico de célula solar PERC foi publicado em 1989, pela *University of New South Wales* (UNSW), apresentando uma arquitetura com 22,8% de eficiência, em escala laboratorial (Blakers, 1989). Esta tecnologia surgiu como forma de aprimoramento das tecnologias de silício e tem sido utilizada comercialmente em substituição às células *Aluminum Back Surface Field* (Al-BSF) (em português, Campo de Superfície Traseira de Alumínio). A partir do ano de 2019 as células PERC passaram a dominar o mercado global, o qual era liderado, anteriormente, por células Al-BSF (ITRPV, 2019; ITRPV, 2020).

A Al-BSF, antes de 2017, permanecia como líder do mercado mundial de tecnologia de células fotovoltaicas, mantendo mais de 90 % de parcela de mercado (Yu, 2023). No entanto, este tipo de célula possui um progresso lento em eficiência. Sua estrutura apresenta perdas ópticas que ocorrem devido à reflectância frontal, perdas de transmissão e de recombinação de carga, resultando na limitação de sua eficiência. A perda por recombinação de carga no lado traseiro ocorre devido ao contato direto entre metal e o *wafer* de silício. O metal introduz no *bandgap* do silício um grande número de densidade de estados de superfície, ocasionando em um aumento da velocidade de recombinação, levando a redução da eficiência da célula solar. Além disso, o *wafer* de silício absorve luz na faixa de comprimento de onda de 1180 nm. Assim, luzes com comprimentos de ondas maiores que 1180 nm são transmitidos através do *wafer* e absorvidos pela placa metálica traseira, produzindo calor e, conseqüentemente, reduzindo a eficiência. Com o intuito de solucionar este problema, novos contatos de passivação foram propostos como alternativa para a redução dessas perdas, como observado em tecnologias PERC (Kashyap *et al.*, 2020; Singh, 2023).

Em comparação às células Al-BSF, as células PERC possuem um aumento de eficiência pela adição de uma camada traseira de passivação, apresentando uma recombinação reduzida e um aumento da refletividade na superfície traseira (Blakers, 2019). Os fótons que atingem a célula podem ser absorvidos, refletidos ou transmitidos. Aqueles absorvidos irão participar da geração de corrente elétrica, os fótons refletidos são considerados perdidos por não contribuírem com a geração de corrente, assim como os fótons transmitidos, que também são considerados desperdiçados por terem energia menor que o *bandgap* e não participam da geração de corrente. O emprego de técnicas de texturização e passivação auxilia no aumento do aprisionamento e absorção da luz e na diminuição de sua reflexão (Kashyap *et al.*, 2020).

Em geral, a estrutura PERC é composta por um contato frontal, uma camada de revestimento antirreflexo (ARC), um *wafer* de silício do tipo p ou n, uma camada de passivação no contato traseiro e frontal e um emissor dopado (Kashyap *et al.*, 2020). Sua construção pode ser observada na Fig. 1.



Figura 1 - Esquema de construção da célula PERC. Fonte: Elaborado pelos autores.

A camada de revestimento antirreflexo promove uma redução da reflexão da luz incidente, auxiliando no aumento da captura de luz e, como consequência, no aumento da eficiência da célula (Wang *et al.*, 2022). A camada SiN_x ajuda no aumento da refletividade interna, auxiliando no aumento do aprisionamento da luz, podendo ser empregado como uma camada ARC (Kashyap *et al.*, 2020). Filmes finos de TiO₂ também se apresentam como um bom material para este propósito, por demonstrarem um índice refrativo adequado e uma boa transmitância (Wang *et al.*, 2022).

O desempenho da célula PERC irá depender de sua estrutura de passivação. Com o auxílio da camada de passivação, a luz incidente que não era absorvida passa a ter mais uma chance de absorção. Além disso, a adição desta camada traseira reduz ligações “penduradas” que favorecem a recombinação de carga na superfície. Essas ligações “penduradas” de átomos de silício podem promover a captura de elétrons, fazendo com que estes elétrons não contribuam com a corrente. Deste modo, a passivação promove a amarração dessas ligações, evitando, assim, a recombinação de cargas. Ainda, uma abertura de contato a laser na parte traseira permite o fornecimento de contato de passivação entre o contato de alumínio e o silício (Kashyap *et al.*, 2020).

Esta camada de passivação tem sido estudada com o intuito de promover o aumento da eficiência em células PERC, empregando materiais como SiO_x , SiN_x e AlO_x para reduzir as perdas por recombinação. O SiO_2 , por exemplo, auxilia na remoção das ligações “penduradas” da superfície de forma eficaz, sendo utilizado como superfície de passivação em conjunto com o SiN_x , de forma empilhada. A camada SiN_x , além de possuir a função de antirreflexo, oferece uma passivação efetiva (Kim *et al.*, 2022). No entanto, a utilização do SiO_2 apresenta a desvantagem de possuir um alto custo de manufatura, devido à necessidade de produção em altas temperaturas, fazendo com que este material passasse a ser menos utilizado pela indústria (Kashyap *et al.*, 2020).

Atualmente, o Al_2O_3 tem sido empregado, mais popularmente, como camada de passivação em substratos de silício do tipo p, por apresentar uma boa passivação química, além de uma passivação de efeito de campo gerada com a superfície de silício dopada por boro, devido à presença de cargas negativas no Al_2O_3 . O Si_3N_4 é utilizado, em geral, como uma camada de cobertura na parte traseira, protegendo a camada de passivação contra danos durante a formação do contato de alumínio da célula e refletindo a luz internamente, melhorando, deste modo, a geração óptica. Assim, a aplicação de uma camada empilhada da forma $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ se torna um bom conjunto para o emprego na parte traseira de células PERC (Sadhukhan *et al.*, 2021). A espessura da camada desses materiais também irá influenciar na otimização de perdas ópticas e elétricas. No estudo divulgado por Sadhukhan *et al.* (2021), foi observado que, em simulações elétricas, camadas de Al_2O_3 com espessura menor que 10nm apresentam um aumento de defeitos. Esses defeitos aumentam à medida em que a espessura diminui. Assim, foi verificado que camadas de 10nm de Al_2O_3 e 75 nm de Si_3N_4 foram as mais adequadas nessas simulações para células PERC do tipo p.

Segundo Tong *et al.* (2021), em células de silício do tipo p dopados por boro, a introdução de átomos de hidrogênio, formando uma camada $\text{SiN}_x\text{:H}$, auxilia na passivação e estabilização de complexos boro-oxigênio que são formados na célula e que favorecem a ocorrência de degradação induzida por luz. Assim, além de evitar este tipo de degradação, a adição do hidrogênio também promove uma melhoria da eficiência de conversão, devido a passivação da superfície e do interior da célula solar causada pela liberação de átomos de hidrogênio da camada $\text{SiN}_x\text{:H}$.

No trabalho de Ahmad *et al.* (2023), são estudadas, em simulação de software, algumas configurações de camadas frontais e traseira, utilizando óxidos como faixa de suporte à camada ARC, com o intuito de reduzir perdas do lado frontal, sendo elas: (i) $\text{SiN}_x/\text{NiO}_x$ na parte frontal e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoO}_x/\text{SiN}_x$ na parte traseira, (ii) SiN_x/WO_x na parte frontal e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoO}_x/\text{SiN}_x$ na parte traseira e (iii) $\text{SiN}_x/\text{TiO}_2$ no lado frontal e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoO}_x/\text{SiN}_x$ no lado traseiro. O MoO_x tem sido visto como um material com interessantes propriedades de passivação, assim como o TiO_x . Foi observado que a construção frontal com óxido de níquel, da configuração (i), demonstrou a eficiência mais alta de célula, de 21,36%, em comparação a 21,08% da configuração (ii) e 20,95% da configuração (iii).

Desta forma, pode-se perceber a importância de investigações a respeito de otimizações de camadas de passivação, como a introdução de novos materiais ou o estudo do dimensionamento dessas camadas, com o objetivo de promover células com eficiências cada vez mais aprimoradas.

2.2 TOPCon

Com o intuito de diminuir as perdas por recombinação de carga e aumentar a eficiência da célula, pesquisas em relação às superfícies de passivação têm sido realizadas, como foi introduzido, por exemplo, na tecnologia PERC. Em continuidade às buscas por tecnologias alternativas, a célula TOPCon do tipo n se tornou um importante candidato a atingir eficiências mais altas, devido a sua superfície de passivação superior e o transporte de carga efetivo (Khokhar *et al.*, 2023).

Em 2014, Feldmann *et al.* (2014) apresentaram a construção de uma célula de silício cristalino com contatos de passivação baseados em silício policristalino (poli-Si) e camadas ultrafinas de SiO_x , sendo chamada de *Tunnel Oxide Passivating Contacts* (TOPCon), a qual tem sido cotada como substituta a célula PERC (Ullah *et al.*, 2023). Este tipo de tecnologia possui algumas vantagens quando comparadas às células de silício cristalino de alta eficiência, como o fácil processamento, disponibilidade de matéria-prima e alto potencial de eficiência (Khokhar *et al.*, 2023). Olhando de um ponto de vista industrial, apesar de células do tipo p serem mais comuns do que as do tipo n, devido ao seu custo-benefício, a qualidade de passivação em estruturas TOPCon do tipo n se mostra mais elevada, gerando uma célula mais eficiente (Ghosh *et al.*, 2022).

Na arquitetura TOPCon, o *wafers* não entra em contato direto com o metal, sendo separada por camadas empilhadas de poli-Si, altamente dopada, e SiO_x , reduzindo a perda por recombinação de carga, além de promover uma boa superfície de passivação e reduzir perdas de absorção (Ullah *et al.*, 2023). Um esquema geral de sua estrutura pode ser visto na Fig. 2. Uma camada de SiN_x é utilizada como um revestimento antirreflexo, na superfície do lado frontal. Uma fina faixa de Al_2O_3 é empregada como camada de passivação, auxiliando na redução de recombinação de carga. Uma junção p-n é formada com um emissor dopado do tipo p, geralmente o boro, no lado frontal e um substrato do tipo n (c-Si). No lado traseiro, uma camada de túnel ultrafina de SiO_2 é aplicada como uma camada transportadora de elétrons seguida de uma fina camada de poli-Si, dopado por um material do tipo n, sendo, em geral, utilizado o fósforo como material dopante (Ullah *et al.*, 2023).

A característica principal da célula TOPCon é a camada de passivação feita com um túnel de filme de óxido e contatos seletivos de cargas que apresentam uma baixa quantidade de recombinação pela dopagem da camada de silício policristalino. A camada de túnel de SiO_2 deve ser fina o bastante para o transporte, de modo que permita a passagem das cargas (Yousuf, 2021).



Figura 2 - Esquema de construção da célula. Fonte: Elaborado pelos autores.

Para aumentar a eficiência de células solares TOPCon é necessário melhorar a qualidade da superfície de passivação, elevando a qualidade da camada de túnel SiO_x e do poli-Si dopado (Ghosh *et al.*, 2022). A camada de óxido de silício SiO_x tem sido otimizada com o intuito de gerar células mais eficientes, diminuindo os defeitos de interface e a contaminação na camada de silício (Khokhar *et al.*, 2023).

As rotas do processo de formação da camada de SiO_x acabam por interferir em sua qualidade de passivação. Estudos demonstraram, por exemplo, que foram obtidas camadas com padrões mais elevados com a utilização de técnicas de crescimento de filme utilizando UV/ O_3 , ao invés do uso de ácido nítrico (HNO_3) quente e concentrado. Outro ponto importante é garantir a estabilidade térmica do material (Ghosh *et al.*, 2022). Assim, é necessário buscar o melhor método para sua produção.

De acordo com Guo *et al.* (2023), o padrão da camada de passivação é sensível, também, a sua espessura. O aumento da rugosidade em superfícies de silício leva ao surgimento de maior quantidade de defeitos do que a área polida, afetando o crescimento da camada de SiO_x e, em consequência, seu desempenho, indicando que uma superfície mais suave de silício seria o caminho para a otimização. No entanto, também é apontado que faces em estruturas piramidais são mais suscetíveis a formar bons contatos, reduzindo a sua resistência, além de permitir o aprisionamento de maior quantidade de luz na camada de poli-Si. Assim, nessas superfícies texturizadas, a obtenção de pirâmides mais arredondadas e achatadas, levam a formação de faixas mais uniformes de SiO_x , aumentando o seu contato de passivação.

A geração de ótimas estruturas de poli-Si dopado irá depender de seu processo de fabricação, assim como da concentração de dopante e espessura da camada. Técnicas de implantação de íon, por exemplo, para o processo de dopagem, foram observadas como mais vantajosas do que processos de dopagem *in-situ* (Ghosh *et al.*, 2022).

Segundo Chen *et al.* (2023), a concentração de fósforo ativado na estrutura de passivação possui um papel importante em seu desempenho. Experimentos foram conduzidos aplicando-se diferentes concentrações de fósforo, pela passagem de um fluxo de fosfina (PH_3) sobre a camada de passivação. Foi observado que grandes concentrações de fósforo originam uma maior quantidade de átomos inativos, dificultando a dopagem do poli-Si. Neste caso há uma maior probabilidade de penetração de fósforo na camada de c-Si, ocasionando em falhas na passivação. Já uma concentração moderada, leva a obtenção de uma camada mais adequada, resultando em maior eficiência. Ainda, para se obter uma alta concentração de fósforo ativo é necessário aumentar a temperatura de ativação, fazendo com que haja maior penetração de fósforo no poli-Si do que na camada de silício cristalino.

A tecnologia TOPCon possui grande potencial para atingir eficiências elevadas, sendo empregadas constantes pesquisas a respeito da otimização de sua estrutura, restando ainda várias possibilidades de estudo para que se descubra novos materiais que promovam a melhor superfície de passivação. Pode ser analisado, por exemplo, o impacto da utilização de contatos seletivos baseados em óxidos metálicos no lugar da camada dopada de poli-Si, simplificando o processo de produção da célula (Ullah *et al.*, 2023).

2.3 HJT

A tecnologia HJT, também conhecida como SHJ (*Silicon Heterojunction*) (em português, Heterojunção de Silício) ou HIT (*Heterojunction with Intrinsic thin Layer*) (em português, Heterojunção com Camada Fina Intrínseca), tem recebido bastante atenção nos últimos anos por apresentar notáveis características, como por exemplo, alta eficiência, produção em baixa temperatura, além de baixa degradação das propriedades de sua estrutura fotovoltaica. Sua construção combina as vantagens do silício cristalino (c-Si) e do silício amorfo (a-Si), atingindo boa eficiência e utilizando menor quantidade de silício (Chuchvaga *et al.*, 2023). Assim como a TOPCon, essa célula também está sendo cotada como um próximo passo tecnológico à arquitetura PERC, apesar de apresentar menor parcela de presença de mercado do que TOPCon nas previsões comerciais (Fazal e Rubaiee, 2023; ITRPV, 2023).

A primeira célula HJT surgiu nos anos 90 com a Companhia Sanyo, apresentando uma eficiência de 12% (Tanaka *et al.*, 1992). A partir de então, essa tecnologia vem evoluindo a cada ano, se tornando promissora para o seu emprego em larga escala, atingindo valores de eficiência em torno de 26%, uma das mais altas dentre as células de silício cristalino. Atualmente, ela é considerada uma das tecnologias de células fotovoltaicas com o crescimento mais rápido

(Chuchvaga *et al.*, 2023). Por possuir um baixo coeficiente de temperatura, sua perda de *performance*, em detrimento do aumento de temperatura, acaba sendo menor durante sua operação em comparação a outras células de silício (Fazal e Rubaiee, 2023). Outro ponto interessante é a sua baixa taxa de recombinação, quando comparada a PERC, permitindo atingir tensões mais altas. Assim, possibilita uma queda menor de potência de saída durante a operação em alta temperatura (Taguchi, 2021).

A estrutura da célula SHJ é feita através de uma espécie de “sanduiche” de uma célula de silício cristalino entre duas camadas de filmes finos de silício amorfo. Um esquema de sua construção está apresentado na Fig. 3. O c-Si, com dopagem do tipo n, é conectado, em ambos os lados, a uma camada de passivação de a-Si:H intrínseca e uma camada dopada de a-Si:H, seguido por uma camada de óxido condutor transparente (TCO – *Transparent Conductive Oxide*). (Fazal e Rubaiee, 2023; Liu *et al.*, 2020).



Figura 3 - Esquema de construção da célula HJT. Fonte: Elaborado pelos autores.

Apesar de os valores de eficiência do silício amorfo não ultrapassarem a faixa dos 14%, ele é um material de menor custo em comparação ao silício cristalino. A utilização de materiais com diferentes *bandgap* permite a formação de junções p-n (Chuchvaga *et al.*, 2023) e garante a absorção de uma maior faixa de luz. A junção de a-Si com c-Si possibilitou o aumento da eficiência para valores maiores que 20% (Liu *et al.*, 2020), além de viabilizar a construção de uma célula com o custo reduzido.

Em tecnologias SHJ, as ligações “penduradas” na superfície do c-Si, que são responsáveis pela recombinação de carga na superfície, são cobertas pela camada a-Si:H, a qual possui um *bandgap* maior que o silício cristalino. Assim, as camadas a-Si:H e c-Si formam boas ligações covalentes e os átomos de hidrogênio capturam as ligações restantes que ficaram soltas. A faixa de a-Si:H promove uma passivação na superfície do silício cristalino, auxiliando, assim, no processo de extração de cargas geradas pelos fótons incidentes e diminuem as perdas por recombinação de carga (Taguchi, 2021).

Tanto a camada a-si:H intrínseca quanto a dopada possuem o papel de passivação da superfície do silício cristalino. No entanto, a faixa intrínseca tem um melhor desempenho nesta atividade. A concentração da dopagem é um fator que pode afetar a qualidade da célula. O aumento desta concentração na porção dopada pode levar ao surgimento de maior quantidade de defeitos, afetando a eficiência da célula (Chuchvaga *et al.*, 2023). A introdução de uma camada a-Si:H intrínseca entre camadas de silício do tipo n e do tipo p pode levar à redução da densidade de defeitos de superfície na interface entre o silício amorfo e o cristalino, melhorando o desempenho da célula (Chuchvaga *et al.*, 2023).

A utilização de uma superfície texturizada de silício cristalino é considerada essencial para a interface de passivação, permitindo uma absorção mais eficiente da luz, por promover a absorção da luz incidente em ângulos menores (Panigrahi e Komarala, 2021; Chuchvaga *et al.*, 2023).

O desempenho da célula HJT também é influenciado pelas características ópticas de filmes TCO, possuindo propriedades de transparência e antirreflexo. A transparência é determinada pela estrutura de bandas do material e por suas condições de deposição. Materiais com *bandgap* maior que 3 eV são mais adequados para serem utilizados, como, o óxido de zinco (ZnO), óxido de índio (In_2O_3) e o óxido de estanho (SnO_2) (Cui *et al.*, 2023). O material mais utilizado como TCO é o óxido de índio e estanho (ITO – *Indium-Tin Oxide*), que auxilia na melhoria da condução lateral e na absorção da luz (Fazal e Rubaiee, 2023). A dopagem desses filmes por outros elementos pode ser uma estratégia para melhorar sua condutividade como, por exemplo, a dopagem do óxido de índio por tungstênio (W), que permite uma redução da concentração de defeitos (Cui *et al.*, 2023).

Ainda, torna-se necessário um maior estudo para a otimização da eficiência de células baseadas no contato entre a-Si/c-Si, devido às perdas de absorção pelo baixo *bandgap* do silício amorfo e à baixa tolerância térmica no processo de metalização (Ullah *et al.*, 2023). Além desses, existem outros desafios a superar como a estabilidade à luz ultravioleta, qualidade do filme fino de silício e o processamento livre de prata e índio (Fazal e Rubaiee, 2023).

2.4 IBC

Dentre as tecnologias de silício cristalino, as atenções de pesquisadores e de corporações estão focadas em avanços de TOPCon e HJT. Células IBC possuem processos de fabricação mais complexos, tornando-as mais custosas,

e inviabilizando-as economicamente quando comparadas às outras tecnologias de silício. No entanto, podem ser empregadas em nichos de mercado específicos, como em telhados e fotovoltaicos de integração de edifícios, veículos e produtos (Kopecek *et al.*, 2023).

O conceito IBC foi primeiramente introduzido no ano de 1977 por Lammert e Schwartz (1977). A construção de uma célula eficiente de silício cristalino com tecnologia IBC foi apresentada em 1984 por Swanson *et al.* (1984). A arquitetura IBC é construída pela integração de dois tipos de contatos com polaridades opostas na parte traseira da célula solar, fazendo com que não tenham fios na parte frontal, eliminando efeitos de sombreamento causado pelos fios, diminuindo o contato de resistência, promovendo, assim, o aumento da eficiência (Yang, 2020). Um esquema de sua estrutura pode ser verificado na Fig. 4.



Figura 4 - Esquema de construção da célula IBC. Fonte: Elaborado pelos autores.

No geral, as células IBC são construídas em substratos de silício do tipo n, com emissores de boro. Na face frontal, uma camada antirreflexo e uma estrutura texturizada (piramidal) permitem o aumento do efeito de aprisionamento de luz. Camadas de passivação térmica no lado frontal e traseiro, feitas de SiO_2 , reduzem a recombinação de carga na superfície, melhorando o desempenho da célula. Essas recombinações de superfície no lado frontal geram um grande impacto no funcionamento da célula. Assim, é necessária uma boa estrutura de passivação para evitar essas recombinações de carga (Liu *et al.*, 2018).

Como a maior parte das cargas geradas pelos fótons é criada na superfície frontal, essas cargas necessitam atravessar toda a região interna até atingir os contatos metálicos, na parte traseira, para serem coletados. Assim, é preciso que um *wafer* de alta qualidade seja utilizado, fazendo com que materiais mais baratos, como o silício multicristalino, não possam ser utilizados (Mat Desa *et al.*, 2016). Um dos desafios da tecnologia IBC é a redução do seu custo de produção, preservando a alta eficiência de conversão. A utilização de técnicas de serigrafia de eletrodos pode ser uma opção para produção de baixo custo (Tomihisa, Shirasawa e Takato, 2020).

Ao eliminar os efeitos de sombreamento, toda a luz que incide sobre o dispositivo pode atingir a superfície frontal da célula solar, gerando valores altos de corrente. Além disso, a estrutura do contato traseiro permite a aplicação de contatos amplos, tendo em vista que esses contatos não estão em face com o sol. A utilização de fios maiores de tabulação na interconexão de células permite a redução de perdas de condução de corrente, melhorando a eficiência (Mat Desa *et al.*, 2016). Esse incremento de área frontal, com maior densidade de conexões elétricas na área traseira, reflete em tecnologias IBC sendo mais utilizadas comercialmente em módulos monofaciais que bifaciais.

Atualmente, a implementação de tecnologias como IBC-TOPCon e IBC-SHJ tem ganhado interesse. A construção IBC-SHJ já demonstrou valores altos de eficiência, na faixa de 26,7% (Fazal e Rubaiee, 2023). A estrutura IBC-POLO, feita com uma arquitetura de silício policristalino em óxido, também já apresentou valores de eficiência maiores que 26%, utilizando um *wafer* de silício do tipo p (Tomihisa, Shirasawa e Takato, 2020). Neste conceito, é empregado um contato de tunelamento passivo, através da aplicação de uma camada de passivação. Vários esquemas de passivação têm sido propostos com o intuito de aumentar a *performance* da célula (Yang, 2020). A combinação desses contatos de passivação com a arquitetura IBC se mostra promissora a quebrar recordes de eficiência.

3. TIPOS DE DEGRADAÇÃO

Com o avanço do setor solar e descobertas de novas tecnologias e materiais que indicam melhoria em eficiência, sistemas fotovoltaicos são adicionados ao mercado, por muitas vezes, sem um completo entendimento em relação a sua durabilidade a longo prazo, podendo levar ao surgimento de degradações aceleradas e ocorrências de defeitos inesperados (da Silva, Gul e Chaudhry, 2021). Uma baixa taxa de degradação e um longo tempo de serviço são aspectos que permitem a confiança na tecnologia. Essas condições são afetadas por materiais de construção, tecnologia de processamento, fatores ambientais e condições de operação (Fazal e Rubaiee, 2023).

Defeitos como descoloração, deterioração do revestimento antirreflexo, trincas, delaminação, pontos quentes, corrosão, quebra de interconexões e formação de bolhas podem ser causados por fatores, como: temperatura, poeira, umidade, velocidade do vento, neve e tempestades (Fazal e Rubaiee, 2023).

A temperatura do módulo é influenciada pelo clima, radiação solar, velocidade do vento e localização geográfica. O aumento em sua temperatura de operação reflete na redução de sua potência de saída. (Fazal e Rubaiee, 2023). Uma porção da irradiância solar absorvida pelo sistema é convertida em calor, devido às perdas de conversão, aumentando a temperatura de operação. Este calor tem um impacto direto na eficiência do aparelho. Em um pior cenário, no caso de

um longo período de operação sob alta temperatura, pode levar a ocorrência de degradações irreversíveis (da Silva, Gul, e Chaudhry, 2021).

Um parâmetro para analisar o impacto do aumento da temperatura na potência do módulo é o coeficiente de temperatura da célula. Tecnologias que apresentam coeficientes mais baixos tendem a ser menos sensíveis ao aumento de temperatura, podendo ser mais adequadas para aplicação em climas mais quentes. Células HJT, por exemplo, possuem um baixo coeficiente de temperatura, apresentando um índice menor de redução de potência com o aumento da temperatura (Fazal e Rubaiee, 2023).

Tendo em vista o forte impacto de fatores ambientais no sistema, as condições climáticas da região de operação do módulo são aspectos importantes para se verificar e podem determinar o tipo de tecnologia a ser empregada. Assim, análises em relação ao comportamento dessas tecnologias em diferentes climas são essenciais. O Brasil, por exemplo, possui grandes variações climáticas, sendo necessária a investigação de diversos aspectos para a aplicação da tecnologia mais adequada para cada região. Algumas regiões apresentam comportamento mais tropical, com temperatura e umidade elevada, enquanto outras regiões exibem um comportamento árido, tendo menor umidade, porém, com variações maiores de temperatura durante um período de 24 horas.

O encapsulante utilizado no módulo é outro elemento que pode impactar no desempenho do módulo. O EVA (*Ethyl Vinyl Acetate*. Em português, Etileno Acetato de Vinila) é o material mais aplicado como encapsulante, devido ao baixo custo e à alta estabilidade térmica. No entanto, ele sofre descoloração quando em exposição à luz UV e à temperatura elevada por um longo período, comprometendo o desempenho do módulo (da Silva, Gul e Chaudhry, 2021). Outro impacto causado pelo EVA é a liberação de ácido acético, quando em exposição à umidade, levando à corrosão da metalização da célula. Células do tipo n, mais vistas em TOPCon e HJT, são mais suscetíveis à rápida degradação com a ação do ácido acético do que células do tipo p, mais observadas em PERC, necessitando de outros materiais encapsulantes. Podem ser empregados, por exemplo, aqueles à base de poliolefinas, como os elastômeros de poliolefinas (POE – *Polyolefin Elastomers*) e as poliolefinas termoplásticas (TPO – *Thermoplastic Polyolefins*) (Sommeling, Liu e Kroon, 2023).

A degradação induzida por potencial (PID – *Potential-Induced Degradation*) é um dos efeitos mais frequentes em tecnologias de silício cristalino, principalmente para usinas fotovoltaicas. Ela ocorre devido à diferença de potencial existente entre a célula solar e a estrutura aterrada do módulo, causando perdas de potência. Este tipo de degradação pode afetar tanto células do tipo p quanto do tipo n. Células de heterojunção mostram-se mais resistentes ao PID em razão da camada de óxido transparente condutora (da Silva, Gul e Chaudhry, 2021).

A degradação induzida pela luz (LID – *Light-Induced Degradation*) é causada pela exposição do módulo à radiação solar, resultando na redução da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito-aberto, ocasionando em perda de potência (da Silva, Gul e Chaudhry, 2021). Células de silício monocristalino do tipo p (geralmente dopadas por boro) estão sujeitas ao LID devido a formação de complexos boro-oxigênio, gerados pela exposição da célula à luz solar, que podem absorver o par elétron-buraco fotogerado. Já as células do tipo n são dopadas por fósforo, o que reduz a tendência de LID (Fazal e Rubaiee, 2023). O gálio é um material que tem sido investigado como substituto ao boro, por possibilitar a criação de células PERC mais estáveis, com menor ocorrência de degradação e melhor custo-benefício (Chen *et al.*, 2021).

Outro tipo de efeito que causa deterioração da célula é a degradação induzida por temperatura e luz (LeTID – *Light and Temperature-Induced Degradation*), causada pela exposição à luz e temperaturas elevadas, em um longo período, levando à perda de *performance* do módulo fotovoltaico. Sua ocorrência é independente do tipo de dopagem da célula e é observada, geralmente, quando o processo de produção da célula solar envolve exposição à alta temperatura, seguido de um resfriamento abrupto. No entanto, se o módulo opera em temperatura menor que 50°C ou em temperatura mais alta, mas por um curto período, não é verificada a ocorrência de LeTID (da Silva, Gul e Chaudhry, 2021).

Um monitoramento e análise de degradação, assim como medidas de prevenção, como uma manutenção periódica do sistema, são importantes para que o tempo de operação do módulo fotovoltaico seja prolongado. Técnicas como inspeção visual, caracterização I-V, imagens de eletroluminescência (EL), imagens de infravermelho e imagens de fluorescência UV podem auxiliar na detecção da degradação em células e módulos (Fazal e Rubaiee, 2023).

4. TENDÊNCIAS DE MERCADO

A alta eficiência, produção em larga escala, custo-benefício, longa durabilidade, além do uso de materiais que não sejam prejudiciais ao meio ambiente são um dos principais objetivos das tecnologias de células solares (Khokhar *et al.*, 2023). Para que uma célula solar seja aplicada comercialmente, ela deve estar alinhada com parâmetros, como: o custo de produção, eficiência e tempo de vida (Meng, You e Yang, 2018). Tecnologias que apresentam baixo custo, alta eficiência e longo período de duração são mais viáveis de serem empregadas em larga escala.

Em termos de comercialização, foi verificado neste trabalho que células Al-BSF que, durante muito tempo, detinham a maior parcela do mercado fotovoltaico, foram substituídas pela tecnologia PERC, a qual passou a registrar valores maiores que 80% a partir de 2018 (ITRPV, 2019).

No entanto, tendo em vista que o cenário fotovoltaico está em constante alteração, com a descoberta de novos materiais, novos métodos e novas tecnologias, mirando no alcance de eficiências mais altas, é esperado que o mercado de células PERC passe a diminuir. Segundo o ITRPV (*International Technology Roadmap for Photovoltaic*) de 2023, as células PERC passariam a registrar valores abaixo de 50% a partir de 2027, chegando a atingir valores próximos a 10%

em 2033. Uma pequena projeção dos dados para as tendências de mercado das tecnologias de silício está apresentada na Fig. 5, tomando como base os dados divulgados pelo ITRPV de 2023.

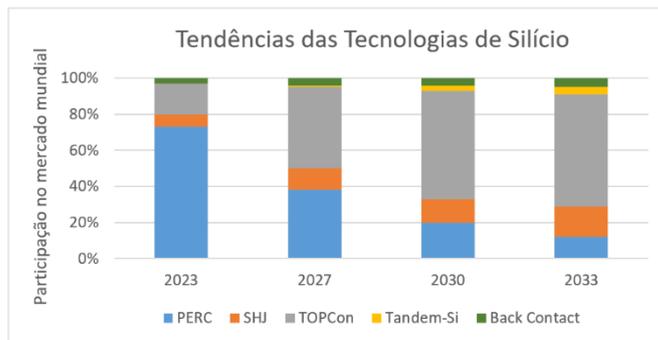


Figura 5 - Projeções do mercado mundial para as tecnologias de silício. Fonte: Adaptado de ITRPV (2023).

Observando a Fig. 5 podemos perceber projeções para o aumento da contribuição de mercado de células TOPCon e HJT, sendo significativamente mais expressiva para a tecnologia TOPCon, a qual é considerada como principal substituta à tecnologia PERC. É projetado que, a partir de 2030, aproximadamente 60% do mercado pertença às células TOPCon. Para a célula HJT, espera-se que em 2033 sua parcela alcance valores próximos a 20% de mercado, atingindo quase que o dobro de parcela da tecnologia PERC (ITRPV, 2023). Assim, verificamos a transição do mercado de células PERC para uma maior predominância de células TOPCon.

5. POTENCIAL BRASILEIRO NO SETOR FOTOVOLTAICO

O Brasil está entre os maiores produtores de silício do mundo. Segundo o Mineral Commodity Summaries 2023 divulgado pelo U.S. Geological Survey, o país é o terceiro maior produtor mundial de silício, ficando atrás somente da China, que detém aproximadamente 70% da produção mundial, e da Rússia (U.S. Geological Survey, 2023). O silício metálico produzido no Brasil possui um nível de qualidade elevada, apresentando alto grau de pureza, sendo considerado um dos melhores do mundo. No entanto, a maior parte da produção nacional não é aproveitada no país, mas sim, dedicada a exportação, sendo consumido por países como Estados Unidos e Alemanha (Sociedade de Investigações Florestais, 2020).

Tendo em vista que o silício é o material mais empregado em tecnologias fotovoltaicas, o Brasil pode ser considerado um forte candidato para a produção de células solares, por apresentar um grande poder de manufatura desta matéria-prima. Apesar disto, não há fabricantes de células fotovoltaicas no país. Atualmente, o Brasil apresenta, mesmo que de forma tímida, alguns fabricantes de módulos fotovoltaicos, os quais realizam importações das tecnologias de silício, principalmente da China, para que seus produtos sejam fabricados (Santos, 2022). Além disso, a maior parte dos módulos presentes em nosso território é importada de países asiáticos, como China, Vietnã e Malásia, suprindo mais de 95% da demanda (Zaparolli, 2022).

O setor solar tem apresentado um grande crescimento no país nos últimos anos. A extensão do território e os níveis de incidência solar contribuem com o potencial nacional para implementação deste tipo de energia, possuindo uma ampla capacidade de produção elétrica (Portal Solar, 2023). Neste ano, o Brasil atingiu a marca de 32 GW de capacidade de energia fotovoltaica instalada em seu território, contanto com usinas de grande porte e sistemas de geração própria, como a instalação em pequenos terrenos, telhados e fachadas, representando um total de 14,7% de capacidade instalada da matriz elétrica nacional. O setor fotovoltaico tem crescido nacionalmente, gerando emprego e novos investimentos, além de reduzir a emissão de CO₂ na geração de eletricidade, contribuindo para o desenvolvimento econômico, social e ambiental brasileiro (Exame, 2023).

No entanto, o setor necessita de maior exploração no território brasileiro. A capacidade de produção de energia elétrica solar e de fabricação de silício indicam que o país tem potencial para se tornar mais competitivo neste mercado, podendo ser considerado como uma das maiores potências no setor solar. Um dos pontos principais para que isto ocorra, é o desenvolvimento de uma fabricação fotovoltaica que seja 100% brasileira, além do aumento de investimento em tecnologias de purificação de silício, alavancando o desenvolvimento e a independência nacional.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho de revisão pôde ser observado alguns aspectos relacionados às tecnologias de células de silício cristalino empregadas no mercado fotovoltaico atual. Detalhes de construção, propriedades de dopagem e passivação são características que identificam essas tecnologias, definem o seu funcionamento e permitem a obtenção de células cada vez mais eficientes. Diversos pesquisadores estão empenhados em aprimorar cada vez mais estas estruturas, garantindo o melhor desempenho ao sistema fotovoltaico.

Estes tipos de tecnologias estão sujeitos à ocorrência de degradação por diversos mecanismos, contribuindo para deterioração acelerada das células. Fatores ambientais como temperatura, umidade, poeira e velocidade do vento, além da ocorrência de PID, LID e LeTID, podem realizar um grande impacto no funcionamento do módulo, afetando sua

eficiência e capacidade de geração de potência. Assim, torna-se essencial o monitoramento e análise dessas degradações, além da contínua realização de pesquisa para investigação e mitigação desses efeitos, garantindo um tempo de operação mais prolongado do módulo.

O cenário do mercado fotovoltaico tem sido modificado, principalmente pelo potencial comprovado da tecnologia, o que incentiva o mercado a investir em pesquisas sobre novos materiais e novas tecnologias, além do desejo de obter eficiências cada vez mais altas. Dentre as tecnologias discutidas, projeções de mercado futuro esperam que a tecnologia PERC se torne defasada, sendo superada por tecnologias do tipo TOPCon e SHJ.

Tendo em vista o crescimento acelerado do setor fotovoltaico, é importante que atenções sejam voltadas ao potencial brasileiro para o emprego em energia solar, em razão de sua capacidade em aproveitar esta energia proveniente do sol e seu potencial para a produção de silício. Desta forma, garantir que o Brasil seja autossuficiente na produção de módulos, resultante de meios 100 % nacionais, contribui para a viabilização do mercado brasileiro como referência no setor.

Agradecimentos

Agradecimentos a Sengi Solar pelo suporte, financiamento e incentivo a este trabalho. Agradecimento a equipe de Pesquisa e Desenvolvimento pelo suporte na elaboração do trabalho. Agradecimentos ao programa PADIS pelo incentivo e fomento ao P&D nacional

REFERÊNCIAS

- Ahmad, W. et al., 2023. A novel approach to reduce both front and rear side power losses in PERC solar cells using different combinations of transparent metal oxides. *Ceramics International*.
- Blakers, A., 2019. Development of the PERC Solar Cell. *IEE Journal of Photovoltaics*.
- Blakers, A. W., 1989. 22.8% efficient solar cell. *Appl. Phys. Lett.*, pp. 1363–1365.
- Bórawski, P. H., 2023. Perspectives of Photovoltaic Energy Market Development in the European Union. *Energy*.
- Chen, C. et al., 2021. Investigating the viability of PERC solar cells fabricated on Ga-instead of B-doped monocrystalline silicon wafer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- Chen, W. et al., 2023. Optimization of activated phosphorus concentration in recrystallized polysilicon layers for the n-topcon solar cell application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- Chuchvaga, N. et al., 2023. Development of Hetero-Junction Silicon Solar Cells with Intrinsic Thin Layer: A Review. *Coatings* 13, 796.
- Cui, W. et al., 2023. Status and perspectives of transparent conductive oxide films for silicon heterojunction solar cells. *Materials Today Nano*.
- da Silva, M. K., Gul, M. S. e Chaudhry, H., 2021. Review on the Sources of Power Loss in Monofacial and Bifacial Photovoltaic Technologies. *Energies*.
- Exame. 2023. Brasil atinge 32 GW de capacidade instalada em energia solar fotovoltaica. Fonte: <https://exame.com/esg/brasil-atinge-32-gw-de-capacidade-instalada-em-energia-solar-fotovoltaica/>. Acessado em: 27 de outubro de 2023.
- Fazal, M. e Rubaiee, S., 2023. Progress of pv cell technology: Feasibility of building materials, cost, performance, and stability. *Solar Energy*.
- Feldmann, F. et al., 2014. Passivated rear contacts for high-efficiency n-type Si solar cells providing high interface passivation quality and excellent transport characteristics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- Ghosh, D. K. et al., 2022. Fundamentals, present status and future perspective of TOPCon solar cells: A comprehensive review. *Surfaces and Interfaces*.
- Guo, C. et al., 2023. Influence of backside surface morphology on passivation and contact characteristics of TOPCON solar cells. *Solar Energy*.
- ITRPV. 2019. International Technology Roadmap for Photovoltaic: 2018 Results. 10th edition.
- ITRPV. 2020. International Technology Roadmap for Photovoltaic: 2019 Results. 11th edition.
- ITRPV. 2023. International Technology Roadmap for Photovoltaic: 2022 Results. 14th edition
- Kashyap, S. et al., 2020. Comprehensive Study on the Recent Development of PERC Solar Cell. 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 2542-2546.
- Khokhar, M. et al., 2023. A Review on p-Type Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon) Solar Cell. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*.
- Kim, J. et al., 2022. A Brief Review of Passivation Materials and Process for High Efficiency PERC Solar Cell. *Trans. Electr. Electron. Mater.* 23.
- Kopecek, R. et al., 2023. Interdigitated Back Contact Technology as Final Evolution for Industrial Crystalline Single-Junction Silicon Solar Cell. *Solar*.
- Lammert, M. D. e Schwartz, R. J., 1977. The Interdigitated Back Contact Solar Cell: A Silicon Solar Cell for Use in Concentrated Sunlight. *IEEE Transactions on Electron Devices*.
- Liu, J. et al., 2018. Review of status developments of high-efficiency crystalline silicon solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*.

- Liu, Y. et al., 2020. High-Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: Materials, Devices and Applications. Materials Science and Engineering. R, Reports.
- Mat Desa, M. K. et al., 2016. Silicon back contact solar cell configuration: A pathway towards higher efficiency. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Meng, L., You, J. e Yang, Y., 2018. Addressing the stability issue of perovskite solar cells for commercial applications. Nat Commun 9.
- Panigrahi, J. e Komarala, V. K., 2021. Progress on the intrinsic a-Si:H films for interface passivation of silicon heterojunction solar cells: A review. Journal of Non-Crystalline Solids.
- Portal Solar. 2023. Energia Solar no Brasil. Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>. Acessado em: 27 de outubro de 2023.
- Sadhukhan, S. et al., 2021. Evaluation of dominant loss mechanisms of PERC cells for optimization of rear passivating stacks. Surfaces and Interfaces.
- Santos, B. (2022). Rumo a uma fabricação solar 100% brasileira. Fonte: PV Magazine Latino América: <https://www.pv-magazine-latam.com/brasil-noticias/a-caminho-rumo-a-uma-fabricacao-solar-100-brasileira/>. Acessado em: 27 de outubro de 2023.
- Shockley, W. e Queisser, H., 2004. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. Journal of Applied Physics.
- Singh, A. U., 2023. Comparative study of commercial crystalline solar cells. Results in Optics.
- Sociedade de Investigações Florestais. (2020). Ligas metálicas – Silício Metálico. Fonte: <https://sif.org.br/2020/07/ligas-metalias-silicio-metalico/>. Acessado em: 27 de outubro de 2023.
- Sommeling, P. M., Liu, J. e Kroon, J. M., 2023. Corrosion effects in bifacial crystalline silicon pv modules; interactions between metallization and encapsulation. Solar Energy Materials and Solar Cells.
- Swanson, R. M. et al., 1984. Point-Contact Silicon Solar Cells. IEEE Transactions on Electron Devices.
- Taguchi, M., 2021. Review - Development History of High Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cell: From Discovery to Practical Use. ECS Journal of Solid State Science and Technology.
- Tanaka, M. et al., 1992. Development of New a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells: ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction-Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer). Japanese Journal of Applied Physics.
- Tomihisa, T., Shirasawa, K. e Takato, H. (2020). Investigation of electrical shading loss of bifacial interdigitated-back-contact (IBC) crystalline silicon solar cells with screen-printed electrode. Japanese Journal of Applied Physics.
- Tong, R. et al., 2021. Tuning back side passivation for enhancing the performance of PERC solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells.
- U.S. Geological Survey. 2023. Mineral Commodity Summaries 2023: U.S. Geological Survey, p.158-159.
- Ullah, H. et al., 2023. Crystalline Silicon (c-Si)-Based Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon) Solar Cells: A Review. Energies .
- Wang, J. et al., 2022. One-step preparation of TiO₂ anti-reflection coating and cover layer by liquid phase deposition for monocrystalline Si PERC solar cell. Solar Energy Materials and Solar Cells.
- Yang, Z., 2020. Back-contact structures for optoelectronic devices: Applications and perspectives. Nano Energy, p. 105362.
- Yousuf, H. K., 2021. A Review on TOPCon Solar Cell Technology. Current Photovoltaic Research, 9(3), 75–83.
- Yu, Y. L., 2023. Influence of the structural differences between end-of-life Al-BSF and PERC modules on the Al leaching separation behavior. Solar Energy.
- Zaparolli, D., 2022. Produção de painéis não é competitiva no Brasil e Ásia atende 95% do mercado. Fonte: Valor Econômico: <https://valor.globo.com/publicacoes/suplementos/noticia/2022/05/30/producao-de-paineis-nao-e-competitiva-no-brasil-e-asia-atende-95-do-mercado.ghtml>. Acessado em: 27 de outubro de 2023.

PHOTOVOLTAIC CELL TECHNOLOGIES USED IN COMMERCIAL MODULES AND THEIR MAIN CHARACTERISTICS: A REVIEW

Abstract. *Due to the growth of the photovoltaic sector, crystalline silicon solar cell technologies have evolved rapidly in recent years. The search for more efficient and reliable materials and arrangements has led to changes in market trends, resulting in cells with better performance. In this regard, this paper provides a review of the main silicon technologies available on the market today (PERC, TOPCon, SHJ and IBC), discussing construction characteristics, passivation, and doping, as well as the main degradation effects seen in these devices. The main differences in construction between each type of cell and the impact of these differences on the operation and efficiency of the cell are observed. It is also noted that factors such as module temperature, type of encapsulant, exposure to solar radiation, among others, contribute to module deterioration. There is also a brief approach to the market trend for photovoltaic technologies, verifying the direction in which the dominance of PERC cells is being replaced by TOPCon cells, as well as a discussion of Brazil's potential in the solar sector, indicating that Brazil has the potential to become a manufacturer of silicon solar cells, and that it is one of the world's leading producers of silicon.*

Keywords: *Photovoltaic technologies, Crystalline silicon, Commercial modules.*