

Revisão Científica da Literatura sobre a Tecnologia Fotovoltaica de Filmes Finos de CdTe

Avaliação dos impactos e benefícios da tecnologia solar fotovoltaica de CdTe da First Solar para aplicações de grande porte no Brasil: desempenho, impactos ambientais e à saúde e segurança



Universidade Federal de Santa Catarina
Grupo de Pesquisa Estratégica em
Energia Solar
www.fotovoltaica.ufsc.br



Instituto para o Desenvolvimento das
Energias Alternativas
na América Latina – IDEAL
www.institutoideal.org

Revisão Científica da Literatura sobre a Tecnologia Fotovoltaica de Filmes Finos de CdTe

Avaliação dos impactos e benefícios da tecnologia solar fotovoltaica de CdTe da First Solar para aplicações de grande porte no Brasil: desempenho, impactos ambientais e à saúde e segurança

Universidade Federal de Santa Catarina
Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar
www.fotovoltaica.ufsc.br

Instituto para o Desenvolvimento das Energias Alternativas
na América Latina – IDEAL
www.institutoideal.org

Sumário

Sumário Executivo	3
1. Introdução.....	8
1.1. Propósito e Escopo.....	9
1.2. O Mercado Solar Fotovoltaico: Tecnologias FV comercialmente disponíveis para aplicações terrestres	9
1.2.1. Efeitos da temperatura no desempenho de sistemas FV	14
1.2.2. Efeitos espectrais no desempenho de sistemas FV	16
1.3. Tecnologia FV de filme fino de CdTe da First Solar, eficiência e projeção de redução de custos	19
2. Revisão de Literatura sobre Telureto de Cádmio (CdTe)	25
2.1. Segurança – Os sistemas FV de CdTe representam um risco ambiental, de saúde ou segurança, sob condições normais de operação e possíveis acidentes, até o fim de sua vida útil, incluindo reciclagem?	25
2.1.1. Química e toxicidade do CdTe	26
2.1.2. Fonte e Disponibilidade de matéria-prima	27
2.1.3. Manufatura	29
2.1.4. Uso do produto.....	34
2.1.5. Descarte e reciclagem do produto ao final de sua vida útil	36
2.2. Pegada de Carbono, Tempo de Retorno Energético e Emissões de Metais Pesados	38
2.3. Uso do solo e biodiversidade.....	40
2.4. Uso da água, tratamento e descarte de resíduos líquidos.....	42
3. Aspectos de desempenho de sistemas FV em climas quentes.....	44
3.1. Desempenho FV de CdTe em climas quentes e úmidos	44
3.2. Acúmulo de sujeira sobre os módulos FV (<i>soiling</i>)	46
3.3. Teste de Confiabilidade	49
3.4. Integração com a rede.....	50
3.5. Dados de desempenho de Campo	54
Referências e Leitura Posterior.....	56

Sumário Executivo

A conversão fotovoltaica (FV) de energia solar é a conversão direta da luz solar em eletricidade. A tecnologia FV é, atualmente, a tecnologia de geração de energia elétrica que mais cresce no mundo [1] e diferentes tipos de tecnologia FV estão disponíveis no mercado. Com a forte redução nos custos vista pelo segmento nos últimos anos, a geração FV tem crescido, constantemente, aproximadamente 55% ao ano nos últimos cinco anos, e está se tornando competitiva frente às tecnologias de geração elétrica convencionais e de larga escala. Dentre as tecnologias FV comercialmente disponíveis, a do Telureto de Cádmio (CdTe) tem demonstrado um desenvolvimento consistente ano após ano referente a redução de custo e melhoria de eficiência.

Esta revisão científica da “Tecnologia Solar Fotovoltaica CdTe: Impactos e Benefícios da tecnologia CdTe da First Solar para implementação em larga escala no Brasil, incluindo a avaliação do desempenho, do impacto ambiental, dos riscos à saúde e da segurança” aborda questões relacionadas tanto à manufatura em larga escala quanto à implantação em larga escala de dispositivos de filme fino de CdTe em usinas solares conectadas à rede elétrica brasileira¹. Uma revisão extensa e independente da literatura publicada foi feita, com o objetivo de avaliar se a manufatura e/ou a utilização dos módulos e sistemas FV de CdTe ocasionam problemas ambientais ou representam riscos à saúde ou de segurança a indivíduos, sob condições normais de operação e possíveis acidentes, em qualquer estágio da fabricação, transporte, instalação, utilização, desativação ou reciclagem. Este trabalho apresenta informações obtidas de literatura e estudos elaborados por terceiros e disponibilizados publicamente, informações obtidas diretamente com a First Solar – produtora de módulos FV de CdTe, além de informações obtidas durante a visita técnica à planta industrial da First Solar em Perrysburg-OH, EUA, em Setembro de 2014.

Comparado com outras tecnologias FV disponíveis no mercado, o CdTe tem um coeficiente de perdas de temperatura relativas à potência mais baixo. Isso faz com que os módulos FV que utilizam esta tecnologia tenham um melhor desempenho quando operam sob as altas temperaturas de operação presentes em campo, especialmente em países quentes e ensolarados como o Brasil. Este estudo também compara o potencial de aplicação em larga escala de plantas solares de CdTe com as tecnologias FV comercialmente disponíveis mais relevantes, bem como com outras tecnologias

¹ No mundo inteiro, desde 2007, o setor do mercado FV relacionado a usinas de grande porte (com potência superior a 5 MWp) tem sido o que cresce mais rapidamente e, desde 2012, representa a maior fatia do mercado global FV em termos de novos MWp instalados [<http://emp.lbl.gov/reports/re>]. No Brasil, a geração por sistemas FV de grande porte é mais recente, com a realização, pelo governo federal, do primeiro leilão solar específico no final do ano de 2014. Neste primeiro leilão solar, foi contratado um total de 31 usinas solares, com uma capacidade nominal total de 1.048 MWp FV.

convencionais de geração elétrica, com ênfase na geração hidrelétrica de larga escala.

A geração hidrelétrica é de longe a maior fonte de geração de eletricidade no Brasil (> 70%), e o consumo de eletricidade no país vem aumentando mais de 5% ao ano nos últimos 40 anos, atingindo 473 TWh em 2014 [2]. Este relatório mostra que, apesar de terem uma baixa densidade de produção de energia por área ocupada, usinas solares FV podem gerar mais eletricidade por área ocupada que grandes usinas hidrelétricas em operação no Brasil².

A Usina de Itaipu³ é um exemplo claro de como a geração FV compara-se com a produção hidrelétrica em termos de ocupação da terra. Se a área superficial de 1.350 km² do lago de Itaipu fosse coberta com módulos FV de CdTe com 15% de eficiência da First Solar⁴, esta usina solar gigantesca teria mais de 200 GWp (ao invés dos 14 GW de potência nominal da usina hidrelétrica de Itaipu) e seria capaz de gerar mais de 240 TWh/ano, sob as condições de irradiação solar onde Itaipu está localizada. Além disso, se os 40.000 km² combinados de toda área alagada pelas hidrelétricas brasileiras fossem cobertos com módulos FV com 15% de eficiência, a capacidade FV instalada total seria próxima a 6 TWp (6.000 GWp!). Se uma geração anual conservadora de energia FV de 1.200 kWh/kWp/ano for admitida para as regiões onde as hidrelétricas operam, cerca de 7.200 TWh de energia elétrica poderiam ser produzidos anualmente pelas usinas FV lá instaladas. Isso representa mais do que 10 vezes o atual consumo elétrico anual no Brasil, mais que o consumo elétrico dos EUA (4.274 TWh em 2013) ou da China (5,023 em 2013), e cerca de 1/3 de todo consumo elétrico anual no planeta [2]!

Esses valores impressionantes são apresentados para dar uma ideia aproximada do potencial de usinas solares FV no Brasil, e comparando com a capacidade FV total acumulada instalada em todo o planeta (aproximando-se a 170 GWp no final de 2014), demonstram que, apesar de seu enorme potencial, ainda há um longo caminho a ser percorrido até que uma utilização mais generalizada da tecnologia FV faça com que a energia solar torne-se um dos principais contribuintes para a matriz energética brasileira ou mundial. Uma última comparação que pode ser feita entre a geração hidrelétrica e a geração solar FV no Brasil está relacionada com a natureza complementar da disponibilidade dos recursos hidrelétrico e solar (p.ex., alta incidência solar em tempos de seca). Muitas das grandes usinas hidrelétricas brasileiras

² Mais de 10% dos cerca de 1.000 GW de capacidade hidrelétrica total instalada no mundo estão instalados no Brasil. O total de área inundada dos 104 GW de hidrelétricas em operação no Brasil é superior a 40.000 km² (<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/energiaassegurada.asp>).

³ Até 2014, a Usina de Itaipu (14 GW de capacidade de geração) era a maior hidrelétrica no mundo em termos de geração elétrica anual. Enquanto a Usina de Três Gargantas (22 GW de capacidade instalada), na China, tem uma capacidade nominal maior, ela tem sido historicamente a segunda maior hidrelétrica em termos de geração elétrica anual, gerando 98,1 TWh em 2012 e 83,7 TWh em 2013, enquanto a geração anual de energia de Itaipu foi de 98,3 TWh em 2012 e 98,6 TWh em 2013 [2]. Em 2014, devido a condições hidrológicas desfavoráveis, foi já antecipado que a geração de Itaipu ficara abaixo da de Três Gargantas.

⁴ Esse relatório é baseado nos módulos FV da First Solar da Série 4, com 15% de eficiência, lançados em 2014.

sofrem restrições sazonais de disponibilidade de água, dependendo do padrão de chuvas particular de determinado ano, enquanto que a geração FV tem dependência quase que nula da água para operar [3,4].

O ano de 2014 apresentou o primeiro leilão nacional de energia com uma categoria específica para energia solar FV e também a pior seca em oito décadas na região sudeste do Brasil. O impulso combinado desses dois eventos podem tornar 2014 o ponto de virada para o desenvolvimento solar FV no Brasil: os resultados do primeiro leilão solar realizado no país, que contratou o primeiro lote de usinas solares FV de larga escala no Brasil (total de 1.048 MWp) foi anunciado no mesmo dia no qual a Usina de Itaipu liberou informação que, devido principalmente à restrição de água, a maior usina energética brasileira gerou menos eletricidade em 2014 que em anos anteriores⁵.

A pegada de carbono da geração FV por CdTe (o equivalente em CO₂ por MWh gerado), bem como o Tempo de Retorno Energético (TRE – em inglês *Energy Pay-Back Time - EPBT*) são apresentados neste estudo e comparados com outras tecnologias FV disponíveis no mercado e com a vasta produção hidrelétrica no Brasil. O TRE é medido em anos e representa o tempo no qual o módulo ou sistema FV de CdTe tem que operar em campo para conseguir produzir a mesma quantidade de energia gasta na fabricação do módulo ou sistema FV. A emissão de CO₂ equivalente, ao longo da vida de uma usina FV de CdTe operando no Brasil, é de cerca de 0,01 tCO₂/MWh (10 g CO₂/kWh), o que é menor, por ordens de magnitude, que qualquer outra fonte energética convencional, incluindo o sistema energético brasileiro dominado pelas hidrelétricas [5-7]. O reservatório de uma hidrelétrica emite gases biogênicos como CO₂ e em sua maioria CH₄, que é um poderoso gás do efeito estufa (de acordo com o IPCC, CH₄ é de 25 a 72 vezes mais forte no aprisionamento do calor que o CO₂, dependendo do prazo considerado [8]). A quantidade de energia que um módulo ou usina solar FV de CdTe será capaz de gerar no Brasil durante seus mais de 25 anos de vida útil é cerca de 30 vezes maior que a energia necessária para produzir o mesmo módulo ou usina solar FV. O TRE típico para o CdTe no Brasil é menor que um ano, atingindo valores de 0,82 a 0,94 ano nas regiões onde as usinas solares FV de grande porte serão instaladas e 1,22 anos nas regiões menos ensolaradas do país. Módulos FV de silício mono e multicristalino operando no Brasil apresentarão valores de pegada de carbono (30 a até mais de 60 gCO₂/kWh) e de TRE (1,82 a 3,97 anos) consideravelmente maiores que os de módulos FV de CdTe.

As emissões de metais pesados são um tópico delicado e esta revisão bibliográfica sobre segurança e saúde aborda essa importante questão, com extensa literatura mostrando que o CdTe é um composto sólido e estável e

⁵ <http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2014/11/1541888-itaipu-perde-lideranca-em-energia.shtml>

insolúvel em água, é muito menos tóxico que o Cd elementar [9,10], além de não vaporizar nas temperaturas às quais os módulos de CdTe são expostos, mesmo que ocorra um incêndio na instalação FV. A Agência Química Europeia (ECHA, de *European Chemical Agency*) não classifica o CdTe como nocivo em casos de ingestão ou contato com a pele e os módulos de CdTe foram aprovados no teste de Procedimento de Toxicidade Característica por Lixiviação da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA, de *Environmental Protection Agency*), designado para determinar o potencial para lixiviação a longo prazo dos produtos depositados em aterros [11,12]. No final do sua vida útil, módulos FV de CdTe descartados das usinas solares no Brasil não devem ser caracterizados como resíduo perigoso se eles não forem descartados no Brasil (ou seja, se forem exportados do Brasil para reciclagem)⁶. Em 2005, a First Solar estabeleceu um programa global de coleta consciente e reciclagem, no qual mais de 90% dos materiais semicondutores e cerca de 90% do vidro são reciclados em instalações localizadas nos EUA, Alemanha e Malásia. Com grandes volumes, muito prováveis em mercados de grande potencial como o Brasil, a First Solar espera reduzir os custos de transporte dos processos de reciclagem e operar instalações de reciclagem (móveis ou locais) que farão parte integrante do processo de manufatura de módulos solares FV de CdTe.

O plano estratégico para o aumento da eficiência de conversão dos módulos da First Solar resultou até meados de 2015 em níveis de eficiência de 15,4%, 16,2% e 18,6% respectivamente para a eficiência média da linha de produção, eficiência máxima da linha de produção e recorde de eficiência da linha de produção respectivamente, com projeções para atingir mais de 20% de eficiência em um futuro próximo e cerca de 25% como limite máximo teórico possível. Considerando a melhor resposta espectral nos comprimentos de onda mais azuis do espectro solar, decorrentes de climas mais úmidos, e o baixo coeficiente de temperatura relativo à potência do CdTe (-0,25 a -0,34%/°C, comparado com -0,45 a -0,50%/°C para o silício cristalino FV), a eficiência de conversão de potência efetiva do CdTe sob operação nas altas temperaturas predominantes em campo no Brasil é maior do que aquelas para a tecnologia FV convencional de silício. Isso representa mais energia gerada (kWh = receita) por unidade de potência instalada (kWp = investimento).

A conclusão global deste estudo é que o CdTe é uma das tecnologias FV mais adequadas para as condições climáticas brasileiras e que os sistemas FV de CdTe não representam riscos ambientais, à saúde, nem de segurança, em condições normais de operação – mesmo considerando acidentes previsíveis – até o final da vida útil do produto, incluindo a reciclagem. A

⁶ Na legislação brasileira, o resíduo que contenha Pb ou Cd é classificado como resíduo perigoso independentemente do volume desses componentes químicos que ele contenha (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – através da normativa NBR 10004:2004). Como Pb e/ou Cd são componentes comumente utilizados em módulos FV comerciais, incluindo módulos FV de Si [9], é provável que todos esses módulos sejam caracterizados como resíduo perigoso, se forem descartados ao fim da vida no Brasil.

tecnologia FV de CdTe oferece uma boa combinação de processamento industrial em larga escala e desempenho em campo, tornando-se uma tecnologia de baixo custo para usinas FV de grande porte no Brasil. As melhorias de eficiência e as reduções nos custos esperadas e demonstradas no plano estratégico da First Solar tornam provável a consolidação desta posição.

1. Introdução

A eletricidade solar ou geração FV solar é a conversão estática e direta da energia dos fótons contida na luz solar em energia elétrica, sem partes móveis, sem ruído e sem emissões para a atmosfera. O efeito FV foi relatado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês A-E. Becquerel, mas o primeiro dispositivo FV prático projetado para conversão de energia foi uma célula solar de silício apresentada em 1954 por pesquisadores da Bell Telephone Laboratories, nos EUA, com uma eficiência de conversão de 6% [13]. Em 1958, as primeiras células solares foram para o espaço para alimentar o satélite americano Vanguard I [14]. Vanguard I foi o quarto satélite artificial a entrar em órbita; sendo que naquele tempo os satélites eram equipados com baterias primárias (pilhas) que descarregavam e desativavam a comunicação com a Terra depois de algumas semanas no espaço. A robustez e confiabilidade das células FV no espaço resultou no Vanguard I comunicando-se com a Terra por mais de 10 anos e este evento foi o ponto de partida para a energia FV alimentar a maioria dos satélites que orbitam nosso planeta até o presente.

A energia FV tem potencial para se tornar a principal fonte renovável e sustentável de geração de energia em todo o mundo, mas esse potencial só pode ser atingido se os dispositivos FV, que irão operar por 25-30 anos de forma confiável em campo, puderem ser produzidos em massa (km^2 por ano) e com custos inferiores a $100 \text{ US\$/m}^2$ [15]. Nos 60 anos decorridos desde os primórdios da tecnologia, com custos de $>1.000 \text{ US\$/m}^2$ – com dispositivos FV de uma única célula com área de cm^2 que só poderiam ser oferecidos para aplicações espaciais – aos $<100 \text{ US\$/m}^2$ dos tempos atuais – com módulos FV com áreas da ordem de m^2 para produção de grandes quantidades de energia em aplicações terrestres – foram aplicados esforços e orçamentos consideráveis em P&D, extensivamente e a nível mundial, sobre um grande número de materiais para a produção de dispositivos FV e em processos industriais de grande escala e de grande rendimento, que finalmente resultaram em módulos FV economicamente competitivos em diversos mercados em todo o mundo. Por fim, no topo de todas as questões relacionadas com a confiabilidade, volumes e custos, a energia FV somente será uma tecnologia de geração de energia verdadeiramente sustentável e viável se todos os processos envolvidos na produção, transporte, instalação, operação, desativação e reciclagem estiverem associados com impactos aceitáveis em termos ambientais, de saúde e de segurança.

1.1. Propósito e Escopo

A First Solar participou em 12 estudos do tipo *Peer Review* desde 2003 [16-27], nos quais especialistas dos EUA (2003), União Europeia (2005), França (2009), Espanha (2010), Japão (2012), Alemanha (2012), Itália (2012), Índia (2012), Tailândia (2012), Oriente Médio (2012), China (2013) e Chile (2013) foram convidados a realizar revisões de literatura sobre os possíveis impactos da implementação em larga escala da tecnologia FV de filme fino de CdTe. Este estudo apresenta uma visão independente da tecnologia FV de filme fino de CdTe produzido atualmente pela First Solar, avaliando os aspectos de desempenho e aspectos de impacto ambiental, saúde e segurança (IASS) dos sistemas FV de CdTe ao longo de todo o seu ciclo de vida, incluindo as questões relacionadas com a pegada de carbono durante a produção e o desenvolvimento dos módulos FV de CdTe e o Tempo de Retorno Energético (TRE) desta tecnologia FV de filme fino. Este relatório discorre brevemente sobre o mercado FV mundial e as tecnologias FV comercialmente disponíveis, descrevendo, em seguida, a tecnologia de produção do módulo FV de CdTe da First Solar e seu planejamento estratégico de custos. A revisão da literatura inclui um estudo extensivo, porém conciso, sobre matérias-primas, fabricação e processos de reciclagem envolvidos na produção de módulos FV de CdTe na First Solar. O relatório também aborda aspectos de desempenho da geração FV por CdTe operando em clima ensolarado e quente, comparando-os com os de tecnologias solares FV mais tradicionais e comercialmente disponíveis e, finalmente, compara o uso do solo e emissões de gases de efeito estufa (GEE) da geração FV por CdTe com as grandes usinas de geração de energia hidrelétrica em operação no Brasil.

1.2. O Mercado Solar Fotovoltaico: Tecnologias FV comercialmente disponíveis para aplicações terrestres

O cenário comercial FV sempre foi dominado por dispositivos de silício mono- ou multicristalino [28], sendo que o filme fino de CdTe é, atualmente, um dos mais sérios concorrentes em termos de eficiência e custo de produção. Células solares de filme fino apresentam vantagens básicas sobre suas contrapartes cristalinas em termos de utilização de materiais, produção em massa e fabricação do módulo e esta tem sido a força motriz para o seu desenvolvimento desde o início dos anos 1970 [28]. Para dispositivos FV de filme fino, dentre os muitos materiais e configurações de dispositivo estudados, três famílias de materiais emergiram e atingiram nível de produção industrial e comercialização: (i) ligas de silício amorfo e microcristalinas (α -Si e μ c-Si); (ii) dispositivos à base de telureto de cádmio (CdTe); e (iii) células solares à base de Cobre, Índio, Gálio e Selênio (CuInGaSe₂ ou CIGS). Essas famílias de materiais de filme fino constituem as chamadas tecnologias FV de Segunda Geração. As células FV de Terceira Geração incluem células solares Orgânicas, Perovskita, Pontos

Quânticos e células Fotoeletroquímicas, atualmente em diferentes fases de P&D e produção piloto. No entanto, até agora apenas o silício cristalino de primeira geração e as três tecnologias FV de Segunda Geração (citadas há pouco) estão disponíveis comercialmente para aplicação e produção em grande escala.

Existe uma infinidade de materiais e tecnologias FV em diferentes estágios de P&D, estudo piloto e produção comercial em todo o mundo. A Figura 1 mostra um gráfico clássico criado e atualizado regularmente por pesquisadores do National Renewable Energy Laboratory (NREL), nos EUA, que inclui as melhores eficiências de células de laboratório, abrangendo todas as tecnologias FV. De interesse imediato para aplicações terrestres em larga escala são as famílias apresentadas em azul e verde no gráfico. Os quadrados azuis sólidos e abertos representam, respectivamente, as mais tradicionais tecnologias FV de Silício mono e multicristalino, que juntas responderam por 90% dos cerca de 40 GWp de FV comercializados no mundo em 2014. Os círculos verdes representam as tecnologias FV de filme fino: a-Si e $\mu\text{c-Si}$; CdTe e CIGS. Dentre essas tecnologias de filme fino, a fatia de mercado em 2014 foi de 23% para a-Si e $\mu\text{c-Si}$; 23% para CIGS e 54% para CdTe. A Figura 2 mostra a evolução do mercado global de FV, de 1997 a 2014. As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, a evolução da participação de mercado dentre essas tecnologias FV de Primeira e Segunda Geração, no início dos anos 1980, e a evolução da fração de mercado entre as tecnologias FV de filme fino desde 2000.

Revisão Científica da Literatura sobre a Tecnologia Fotovoltaica de Filmes Finos de CdTe

Avaliação dos impactos e benefícios da tecnologia solar fotovoltaica de CdTe da First Solar para aplicações de grande porte no Brasil: desempenho, impactos ambientais e à saúde e segurança

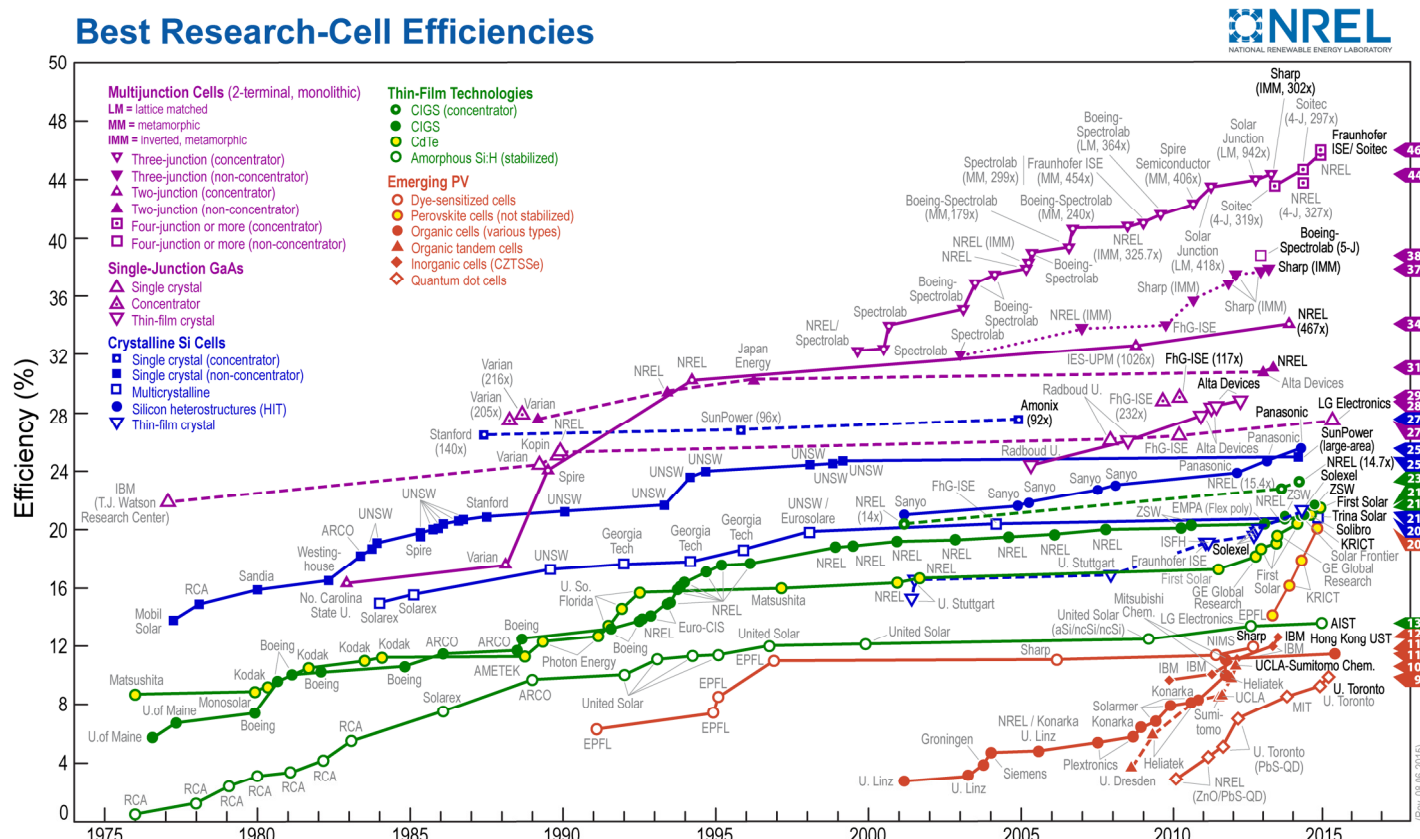


Figura 1: Gráfico de eficiência da célula solar do National Renewable Energy Laboratory – NREL [29], mostrando a evolução das melhores eficiências de células de laboratório desde 1970 (atualizado em Junho de 2015).

Revisão Científica da Literatura sobre a Tecnologia Fotovoltaica de Filmes Finos de CdTe
 Avaliação dos impactos e benefícios da tecnologia solar fotovoltaica de CdTe da First Solar para aplicações de grande porte no Brasil: desempenho, impactos ambientais e à saúde e segurança

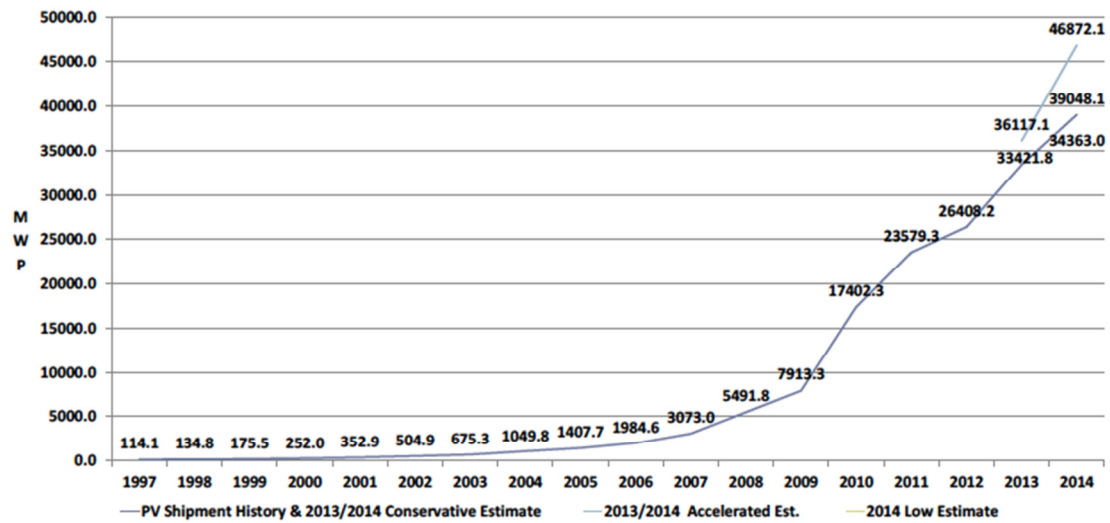
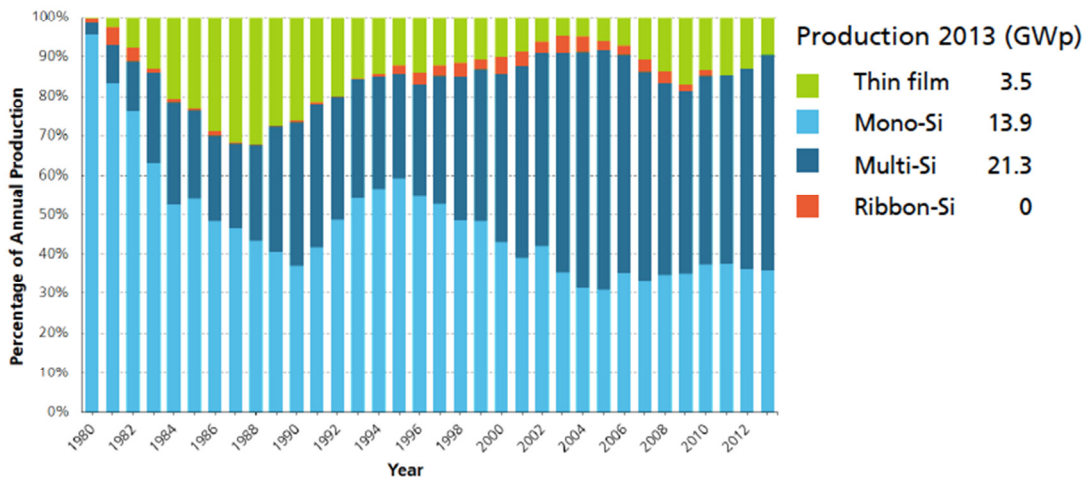


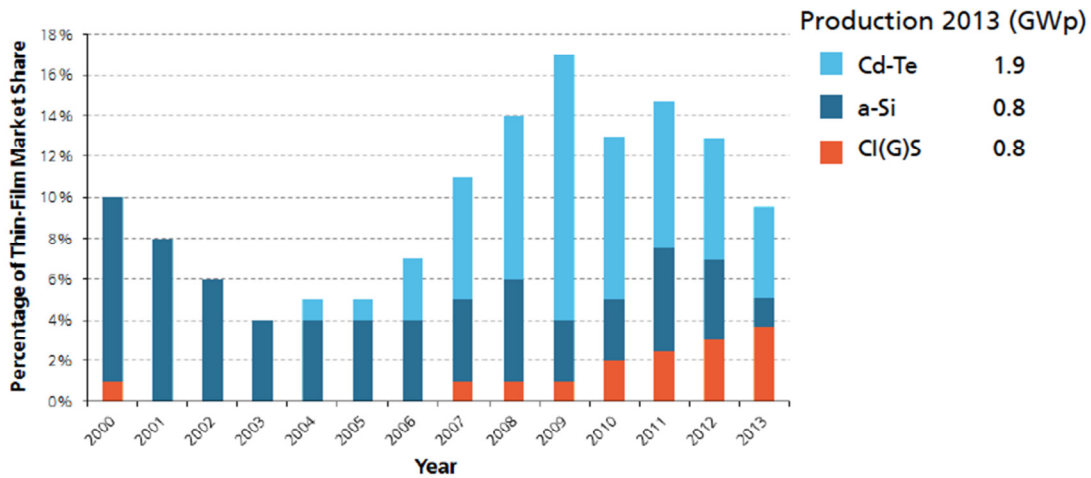
Figura 2: Mercado FV global de 1997 a 2014 [30]. Com os programas de incentivo FV que foram iniciados com o estabelecimento da tarifa *feed-in* alemã, no início dos anos 2000, o mercado FV global atingiu a escala necessária para uma redução de custo efetiva e que ainda está em curso.



Data: from 2000 to 2010: Navigant; from 2011: IHS (Mono-/Multi- proportion estimated). Graph: PSE AG 2014

Figura 3: Evolução da quotas de mercado da primeira e segunda geração de tecnologias FV, de 1980 a 2013 [31].

Revisão Científica da Literatura sobre a Tecnologia Fotovoltaica de Filmes Finos de CdTe
 Avaliação dos impactos e benefícios da tecnologia solar fotovoltaica de CdTe da First Solar para aplicações de grande porte no Brasil: desempenho, impactos ambientais e à saúde e segurança



Data: from 2000 to 2010: Navigant; from 2011: IHS (Mono-/Multi- proportion estimated). Graph: PSE AG 2014

Figura 4: Evolução da fatias de mercado da segunda geração de tecnologias FV de filmes finos, de 2000 a 2013 [31].

As células FV de Segunda Geração, ou de filmes finos, são tipicamente um laminado de vidro-vidro, com uma camada muito fina de semicondutores ativos, contatos de metal e de óxido, encapsulados entre estas duas lâminas de vidro. A estrutura da célula solar de filme fino da First Solar é mostrada na Figura 5.

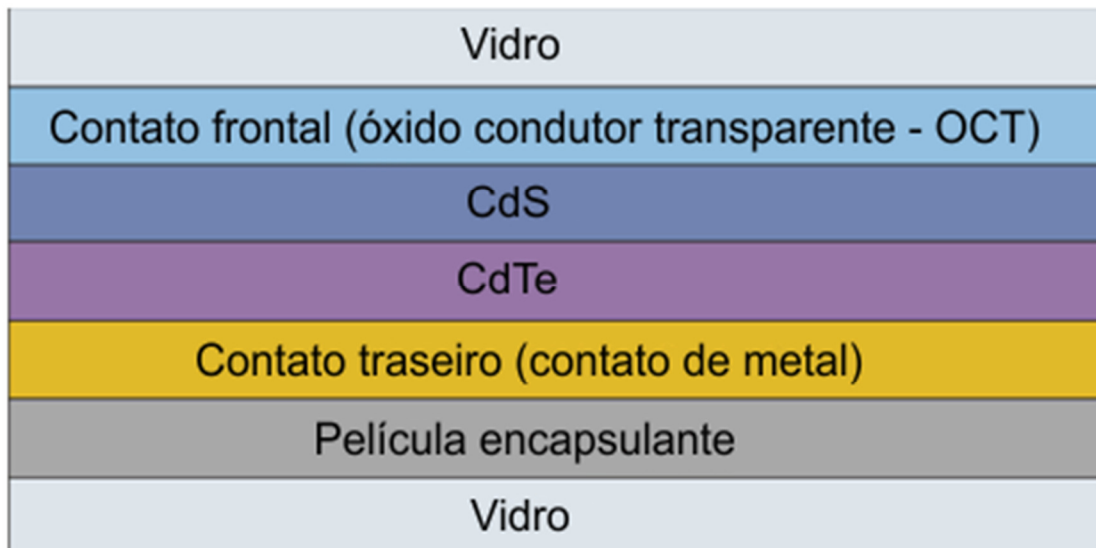


Figura 5: Estrutura esquemática (espessura das camadas não está em escala) dos módulos FV de filme fino de CdTe da First Solar, mostrando os semicondutores ativos CdTe e CdS, e os contatos de metal e óxido (traseiros e frontais, respectivamente) encapsulados entre as duas folhas de vidro.

A pesquisa em CdTe remete à década de 1950, depois que foi identificado que o seu valor de banda proibida (~ 1,5 eV) coincide quase que perfeitamente com a distribuição dos fótons no espectro solar em termos de conversão em eletricidade. Um design simples de junção heterogênea evoluiu, no qual o CdTe do tipo *p* foi combinado com o CdS do tipo *n* [32]. A célula foi completada pela adição de contatos frontais e traseiros. Os primeiros líderes em eficiência de células CdTe/CdS foram a GE em 1960, e, em seguida, Kodak, Monosolar, Matsushita e AMETEK. Na Europa, o desenvolvimento de células solares de filme fino de CdTe começou com o dispositivo CdTe/CdS de 6% de eficiência, apresentado por Bonnet e Rabenhorst em 1972 [33]. Extensiva P&D foi realizada para atingir a eficiência campeã atual de 21,5% para um dispositivo de célula única de pequena área, e de 18,6% de eficiência para um módulo FV completo (0,72 m²), composto por 216 células de CdTe, ambos produzidos pela First Solar e com eficiências confirmadas de forma independente [34]. A eficiência teórica para células solares CdTe/CdS de junção simples é de 33% [35]. O CdTe comercialmente disponível tem, atualmente, o mesmo nível de eficiência do silício multicristalino, e possui potencial de atingir, e até mesmo ultrapassar, os níveis de eficiência de silício monocristalino no futuro⁷ próximo.

1.2.1. Efeitos da temperatura no desempenho de sistemas FV

Todos os dispositivos FV sofrem perdas de desempenho com o aumento da temperatura das células quando em operação. O coeficiente de temperatura negativo da potência ($T_{\text{coeff}}P_{\text{max}}$) de dispositivos FV de primeira e segunda geração são mostrados na Tabela 1 e os efeitos negativos de temperaturas de operação em campo na potência são mostrados na Figura 6.

Tabela 1: Coeficiente de temperatura da potência ($T_{\text{coeff}}P_{\text{max}}$) para módulos FV de primeira e segunda geração (adaptado de [36]).

Tecnologia FV	Si cristalino	a-Si/ μ c-Si	CIGS	CdTe ⁸
$T_{\text{coeff}}P_{\text{max}}$, %/°C	-0,41 a -0,57	-0,10 a -0,30	-0,36 a -0,50	-0,25 a -0,34

Para uma temperatura máxima de operação de 65°C da célula FV em campo, as perdas relacionadas à temperatura em uma planta FV de CdTe serão da ordem de 10%, enquanto que as perdas relacionadas à temperatura para o silício cristalino serão em torno de 18%.

A eficiência de conversão está diretamente relacionada com a pegada de carbono da planta solar FV, o que é particularmente importante para o uso da tecnologia FV em larga escala, no que se refere ao uso do solo, estruturas de

⁷ R. Garabedian, "Technology Update", First Solar Analyst Meeting, 2014.

⁸ In 2015, Series 4-2 First Solar FV modules will be commercially available with higher efficiency, but slightly higher temperature coefficient: -0.34%/°C.

apoio metálicas para a montagem em solo de geradores FV e fiação de cobre, que são parte dos chamados custos de Balanço do Sistema (BOS – do inglês *Balance of System*). Com o rápido declínio dos custos dos módulos FV, os custos BOS estão se tornando dominantes e a eficiência atual de mais 15% do módulo de CdTe da First Solar, juntamente com seu baixo coeficiente de temperatura da potência, resultam no mesmo nível efetivo de eficiência de conversão que o do silício multicristalino para operação em climas quentes como o Brasil.

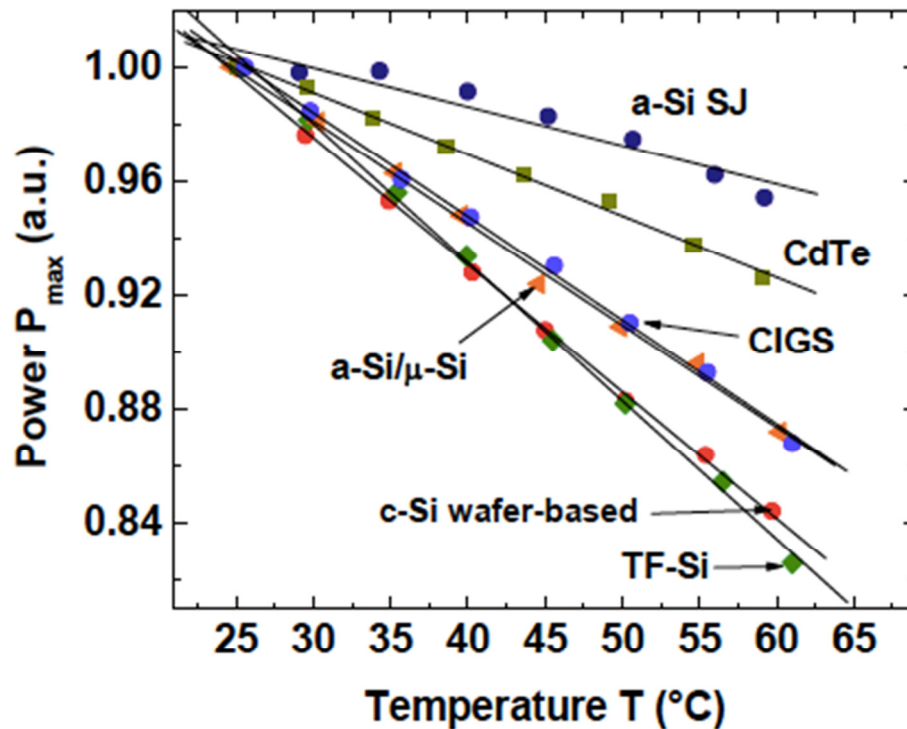


Figura 6: O efeito negativo das temperaturas de operação da célula sobre a potência de saída, para tecnologias FV de primeira e segunda geração [36].

1.2.2. Efeitos espectrais no desempenho de sistemas FV

Para tecnologias FV de primeira e segunda geração, a eficiência de conversão de um módulo FV é também dependente da banda proibida do material semicondutor correspondente e diferentes semicondutores irão “ver” diferentes porções do espectro solar. A Figura 7 mostra as curvas de eficiência quântica externa para diversas tecnologias FV, que se traduz na resposta espectral do dispositivo. Enquanto o silício cristalino e os filmes finos de CIGS têm uma resposta espectral que se estende a partir de 380 nm até cerca de 1180 e 1280 nm respectivamente (são dispositivos FV “mais vermelhos”), o filme fino de a-Si responde à luz na região de 360 nm a 790 nm e o filme fino de CdTe será capaz de converter fótons em eletricidade no intervalo de 280 nm a 900 nm. Os filmes finos de a-Si e CdTe são, portanto, dispositivos solares “mais azuis” do que o silício cristalino e o CIGS e apresentarão melhor desempenho em climas com altos níveis de cobertura de nuvens, que levam a um deslocamento para a região azul do espectro.

O espectro padrão ASTM G173-03 foi derivado com base na distribuição espectral da luz solar para diversos locais na América do Norte com elevado nível de Irradiação Direta Normal (média de 2.410 kWh/m²/ano e variando de 2190 a 2740 kWh/m²/ano), onde o céu limpo é predominante e os níveis de Profundidade Óptica do Aerossol (POA) são baixos. Esses locais apresentam uma distribuição espectral da luz solar mais deslocada para o vermelho do que é encontrado normalmente em localidades brasileiras, onde a presença de diferentes níveis de cobertura de nuvens leva a uma distribuição espectral deslocada para o azul. A Figura 8 mostra o conteúdo espectral da luz solar na latitude inclinada em Petrolina-PE (latitude 9°23” Sul), um típico local quente e ensolarado no nordeste brasileiro, em comparação com o espectro ASTM G-173. A Figura 9 mostra, para quatro localidades brasileiras, abrangendo de Norte a Sul e Leste a Oeste, o desvio do espectro ASTM G-173, onde pode ser visto que a distribuição espectral da luz solar em todos os quatro locais brasileiros contém mais fótons azuis e menos fótons vermelhos do que o espectro padrão ASTM G-173. Assim, pode-se inferir que, do ponto de vista do conteúdo espectral, módulos FV de CdTe devem apresentar um bom desempenho nestes locais.

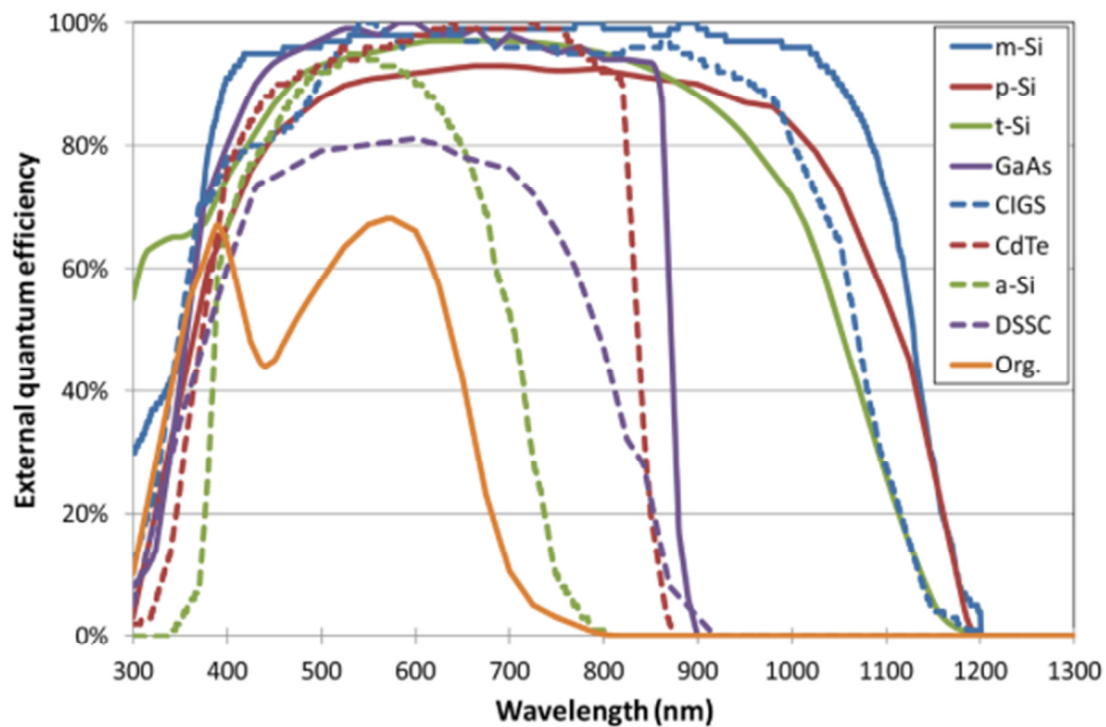


Figura 7: Curvas de eficiência quântica externa para diversos materiais de células solares. Quanto mais à esquerda uma curva se encontra (baixos comprimentos de onda), melhor o material correspondente irá responder a um conteúdo espectral azul da luz [37].

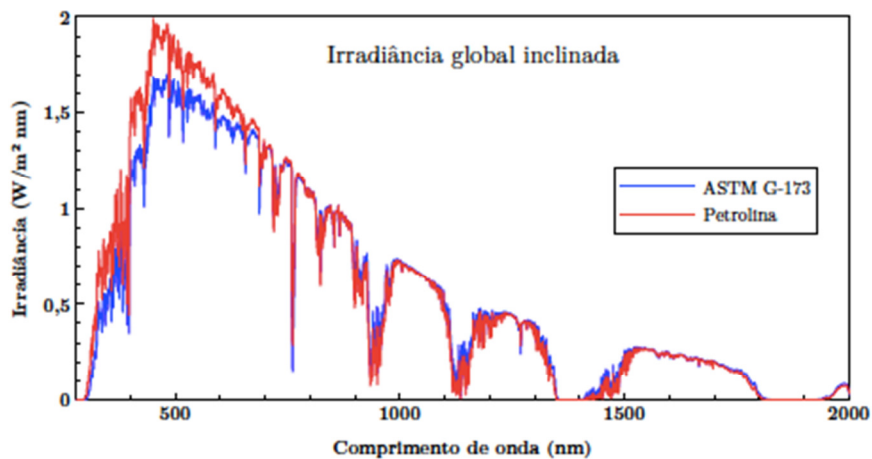


Figura 8: Distribuição espectral da luz do sol em Petrolina – PE (latitude 9°23" Sul), em comparação com o espectro padrão ASTM G-173, mostrando o maior nível de irradiação nos comprimentos de onda mais baixos (mais azuis) para planos com inclinação igual à latitude local e voltados para o Norte geográfico [38].

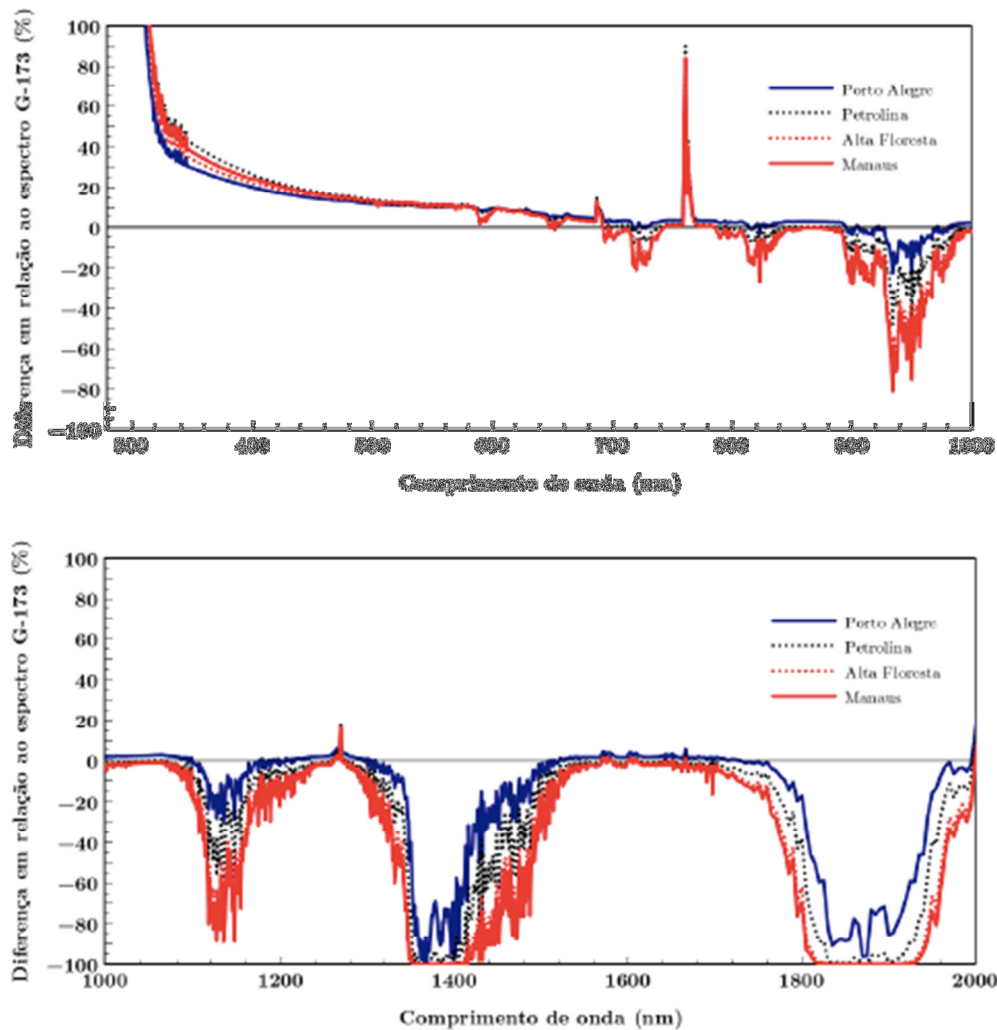


Figura 9: Diferença relativa entre o conteúdo espectral da luz do sol para quatro localidades no Brasil e o espectro padrão ASTM G-173, mostrando que para as quatro localidades a distribuição espectral tem mais fótons azuis e menos fótons vermelhos que o espectro padrão [38].

Dentre as tecnologias FV comercialmente disponíveis, a de filme fino de CdTe apresenta uma boa combinação de alta eficiência, baixo coeficiente de temperatura ($T_{\text{coeff}}P_{\text{max}}$) e resposta espectral se aproximando mais do conteúdo espectral da luz solar em localidades brasileiras. Espera-se que esta tecnologia apresente um desempenho superior em termos de kWh gerados (= receitas) por kWp instalado (= investimento) no Brasil.

1.3. Tecnologia FV de filme fino de CdTe da First Solar, eficiência e projeção de redução de custos

A First Solar foi fundada em 1999 após a aquisição da Solar Cells Inc, e foi o primeiro fabricante FV a produzir 1 GWp de módulos solares em um único ano e a quebrar a barreira de 1 US\$/Wp do custo de produção (0,63 US\$/Wp em 2013⁹).

A First Solar também foi o primeiro fabricante FV a implementar um programa de reciclagem global de módulos FV em 2005. O produto FV básico da First Solar é um laminado de vidro de 12 kg, sem moldura, com área de 60 x 120 cm, onde diversas (atualmente 216) células FV de semicondutores CdTe/CdS monoliticamente integradas são encapsuladas entre um vidro termicamente reforçado de 3,2 mm na parte frontal e um vidro temperado de 3,2 mm na parte traseira. Na mesma área superficial de 0,72 m², módulos FV produzidos em 2004 apresentavam potência nominal de 45 Wp (6,25% de eficiência de conversão), enquanto módulos FV atuais (1º trimestre de 2015) atingem potências de até 110 Wp (15,28% de eficiência de conversão) em condições padrão de teste (CPT¹⁰).

Além de desenvolver sua própria tecnologia e manufatura de módulos solares de CdTe, a First Solar também é um desenvolvedor e contratante de usinas de energia solar (mais de 3 GWp em projetos contratados em 2014) e, atualmente, opera mais de 2 GWp de usinas de CdTe, com uma disponibilidade média de operação do sistema de mais de 99%¹¹. A empresa é pioneira no desenvolvimento de integração com a rede elétrica, controle e previsão de geração de usinas avançadas e programação de despacho de energia, com o objetivo de integrar a energia solar FV em grande escala (do inglês *utility-scale*) na matriz energética global.

Em um esforço para reduzir ainda mais os custos de geração FV em grande escala, a First Solar recentemente elevou a 1500 V a tensão nominal máxima de seu módulo FV, o que resulta em menores custos BOS. A First Solar também tem concentrado seus esforços de marketing e posicionamento estratégico no mercado FV com foco em projetos multimegawatt e tem obtido sucesso em construir alguns dos maiores projetos FV instalados até o momento. Como a Figura 10 mostra, com a progressiva redução dos programas de incentivo FV do tipo *feed-in* em todo o mundo, o mercado FV está mudando de pequenos geradores FV distribuídos nas coberturas residenciais, para mais usinas solares comerciais em escala de distribuição, onde os ganhos de escala continuam a proporcionar reduções de custo consistentes ano-a-ano.

⁹ T. de Jong, "Manufacturing Update," First Solar Analyst Meeting, 2014.

¹⁰ CPT são Condições Padrão de Teste sob as quais é estabelecida a potência nominal dos módulos FV. As CPT incluem: Irradiância = 1000 W/m²; temperatura de junção da célula = 25°C e conteúdo espectral da luz do sol equivalente ao AM 1,5.

¹¹ T. Kuster, "System Technology Update," First Solar Analyst Meeting, 2013.

G. Antoun, "EPC, O&M and Market Segments," First Solar Analyst Meeting, 2014.

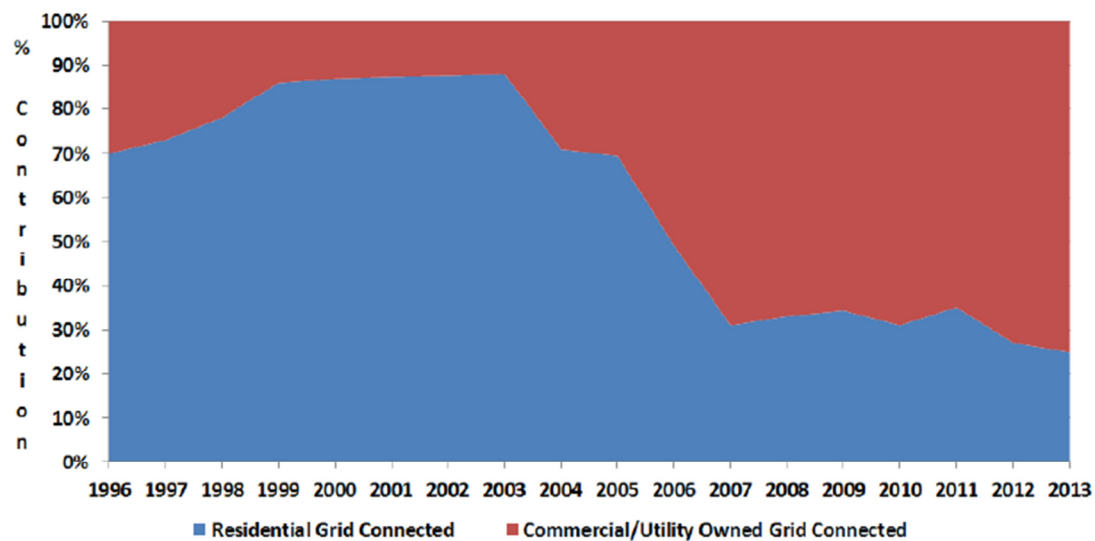


Figura 10: Evolução da participação de sistemas FV residenciais conectados à rede (micro- e mini-geração distribuída) e plantas FV multi-megawatt (geração em larga escala) [39]. Sistemas FV de grande porte atualmente representam mais que 2/3 do mercado FV mundial.

O CdTe pode ser produzido por uma variedade de tecnologias, incluindo Sublimação em Espaço Fechado (SEF), Deposição por Transferência de Vapor (DTV), eletrodeposição, serigrafia, deposição de vapor de plasma ou pulverização catódica, entre outros [15,28]. A First Solar processa seus módulos usando uma alta taxa de DTV, que é semelhante à SEF. Como a taxa de deposição DTV é muito alta, a First Solar converte vidro em módulo em menos de 2,5 horas.

A First Solar possui e opera três instalações de fabricação e reciclagem de módulos FV de CdTe: em Perrysburg-OH, EUA (PBG); em Frankfurt-Oder, Alemanha (FFO); e em Kulim, Malásia (KLM). A Figura 11 mostra a produção total anual de módulos FV em cada local e a produção anual acumulada total. Com a redução progressiva do programa de incentivo do tipo *feed-in* alemão, as operações da planta alemã foram interrompidas em 2012 e a planta FFO atualmente hospeda apenas as atividades de reciclagem da First Solar. Através de eficiência e melhorias no rendimento, a First Solar espera ter uma capacidade de produção anual combinada de cerca de 3500 MWp em 2018. A First Solar dedica cerca de 25% da capacidade da planta PBG para P&D e gasta 4,5% da sua receita em P&D. No final de 2013, a First Solar estava operando cada uma das linhas de produção individuais a uma taxa de produção de 79 MWp/ano, e a um custo de fabricação de 0,63 US\$/Wp. A aplicação dos resultados de P&D no contato elétrico posterior e no revestimento anti-reflexivo dos módulos levaram a uma produção de 89 MWp/ano no final de 2014. Os esforços contínuos em P&D levam a previsões de que se atinja mais de 130 MWp/ano por linha de produção individual até o final de 2018, como mostrado na Figura 12.

Revisão Científica da Literatura sobre a Tecnologia Fotovoltaica de Filmes Finos de CdTe
 Avaliação dos impactos e benefícios da tecnologia solar fotovoltaica de CdTe da First Solar para aplicações de grande porte no Brasil: desempenho, impactos ambientais e à saúde e segurança

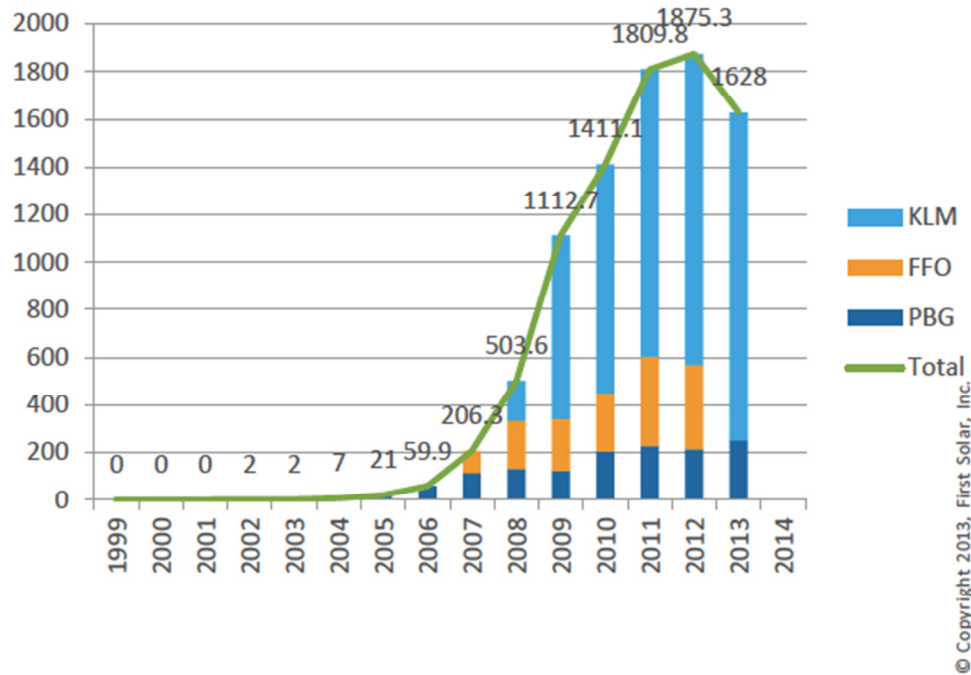


Figura 11: Produção anual de módulos FV (em MWp/ano) para as três plantas de produção e reciclagem de módulos FV de CdTe que a First solar opera em Perrysburg-OH, EUA (PBG); Frankfurt-Oder, Alemanha (FFO); e Kulim, Malásia (KLM).

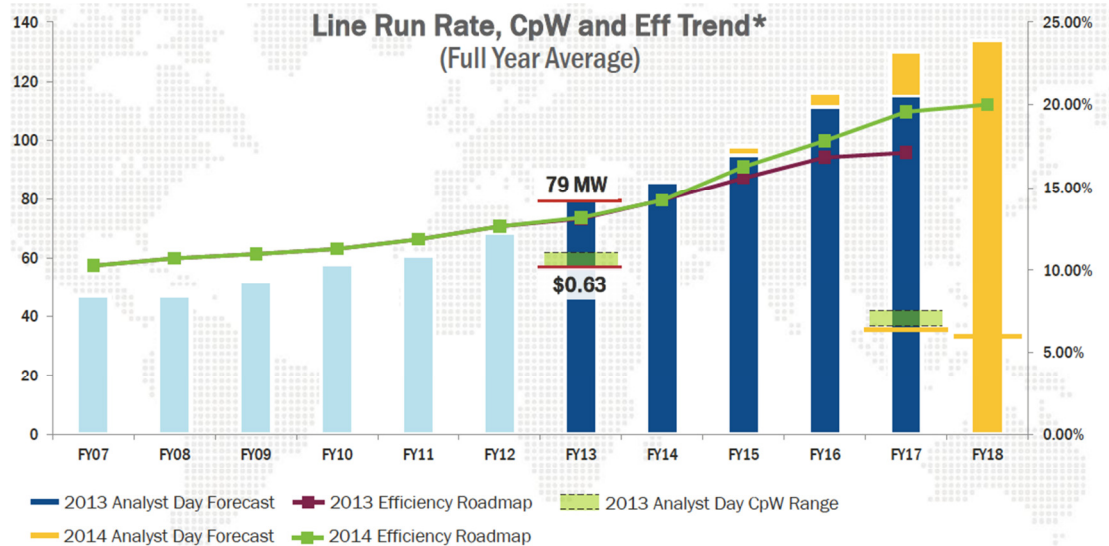


Figura 12: Incrementos anuais nas taxas de produção de cada linha individual de produção da First Solar, e as previsões revistas de aumento de eficiência, com níveis de eficiência de 15% ao final de 2014, e 20% em 2017-2018.

As projeções de aumento da eficiência apresentadas na Figura 13 mostram que as melhorias esperadas nos módulos FV de CdTe da First Solar deverão atingir níveis de eficiência que se aproximam de 20% em 2017-2018. A projeções de redução dos custos de módulos e sistemas FV da First Solar são apresentadas na Figura 14. Como é de se esperar, o aumento na eficiência causa uma redução no custo de produção. Em 2017, a First Solar espera que os custos do sistema FV de CdTe atinja valores abaixo da marca de 1 US\$/Wp.

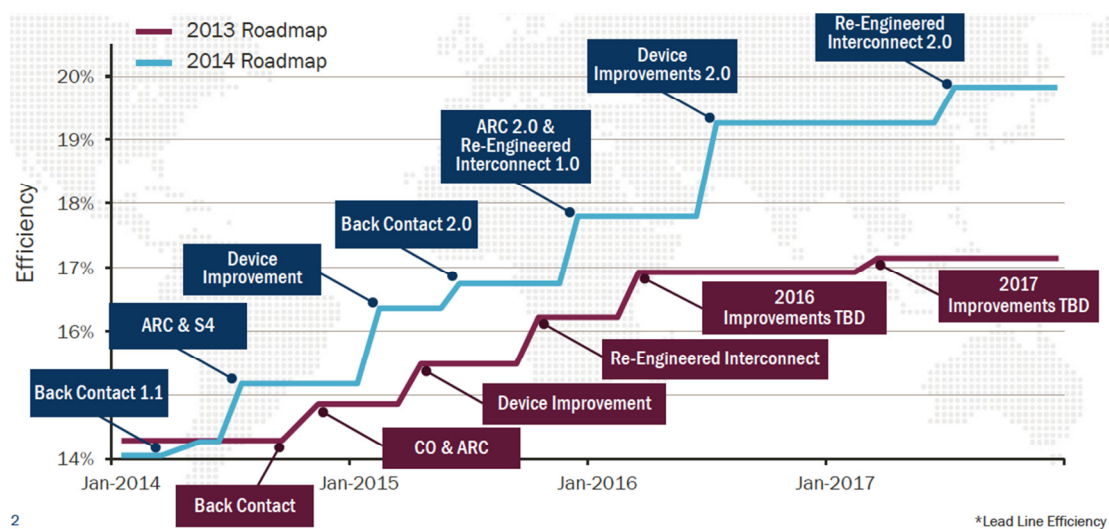


Figura 13: Projeções da First Solar para aumento de eficiência de módulos FV de CdTe, mostrando as estratégias de P&D da empresa para o período de 2014 a 2017.

Revisão Científica da Literatura sobre a Tecnologia Fotovoltaica de Filmes Finos de CdTe
 Avaliação dos impactos e benefícios da tecnologia solar fotovoltaica de CdTe da First Solar para aplicações de grande porte no Brasil: desempenho, impactos ambientais e à saúde e segurança

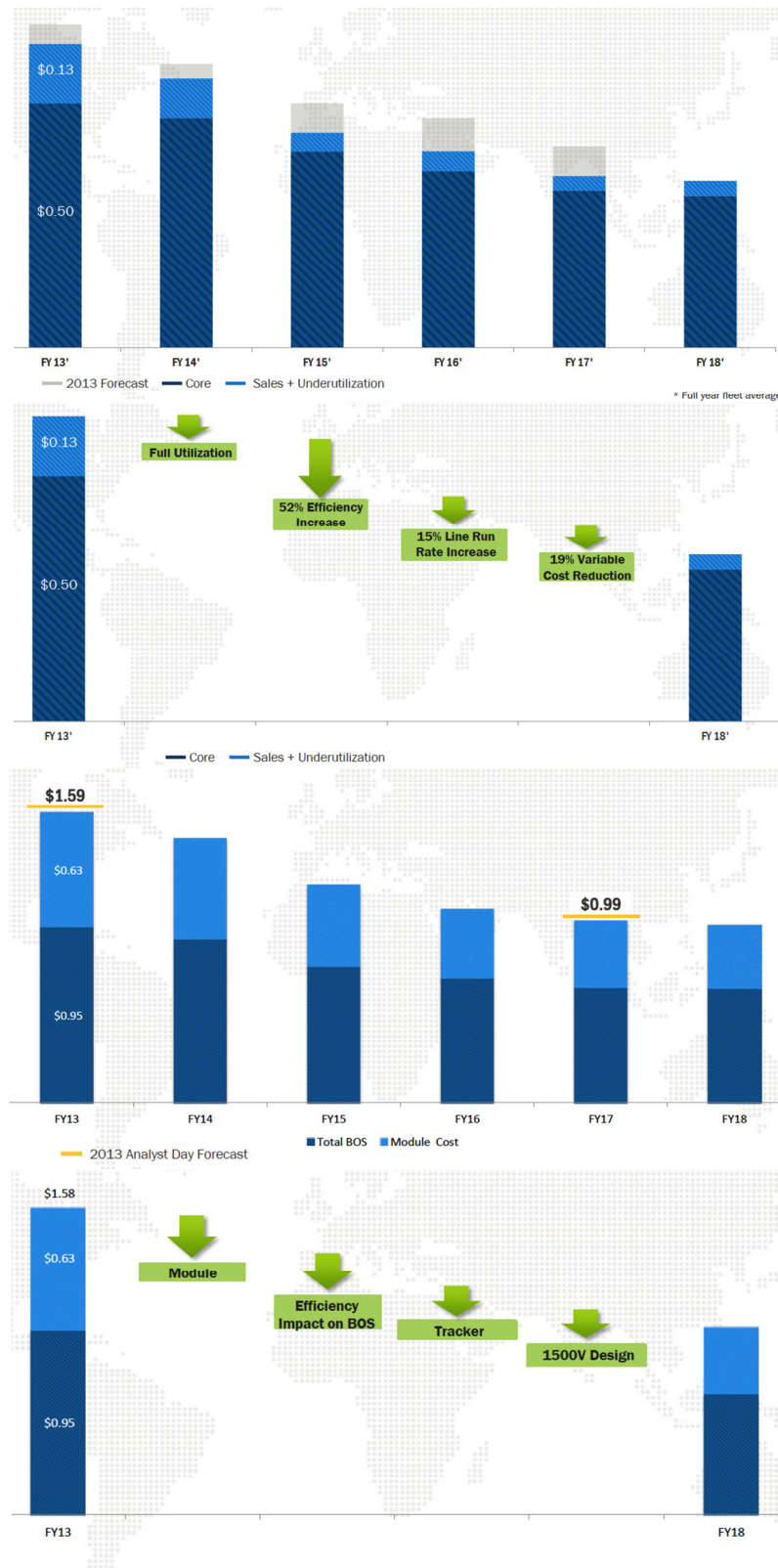


Figura 14: Projeções da First Solar para redução do custo de produção de módulos FV de CdTe (primeiro e segundo gráfico) e de plantas FV (terceiro e quarto gráfico), para o período de 2014 a 2018. Em 2017, a companhia espera que o custos do sistema FV de CdTe completo atinja valores abaixo da marca de 1 US\$/Wp.

Os processos de fabricação utilizados pela First Solar na produção de módulos FV de CdTe são os mesmos em todas as plantas da First Solar ao redor do mundo e a empresa adotou a filosofia de replicação “*Copy Smart*” para a construção rápida de novas instalações de produção, para minimizar o risco de problemas com o cronograma, custos, impacto ambiental, problemas de saúde e segurança, enquanto garante a qualidade e a uniformidade do produto. Os módulos FV da First Solar são idênticos em qualquer lugar do mundo em que são fabricados e as novas linhas de fabricação operam com a mesma eficácia em termos de custos, produtividade e consistência que a planta base em Perrysburg. As contínuas melhorias obtidas em qualquer uma das instalações de produção podem ser transferidas e implementadas rapidamente e globalmente após o conceito ter sido comprovado em um das plantas.

A próxima seção apresenta uma revisão da literatura sobre os aspectos ambientais, saúde e de segurança na produção, transporte, utilização, desativação e reciclagem dos módulos FV de CdTe, mostrando os impactos e benefícios da tecnologia de geração solar da First Solar para implantação em larga escala no Brasil. A última seção deste relatório apresenta questões relacionadas com o desempenho FV em climas quentes.

2. Revisão de Literatura sobre Telureto de Cádmio (CdTe)

2.1. Segurança – Os sistemas FV de CdTe representam um risco ambiental, de saúde ou segurança, sob condições normais de operação e possíveis acidentes, até o fim de sua vida útil, incluindo reciclagem?

Questões têm sido levantadas sobre módulos FV de CdTe relacionadas ao metal pesado Cd e à possibilidade de sua liberação, seja durante a fabricação do módulo, transporte, implantação, desativação ou reciclagem [15]. O ciclo de vida do módulo de CdTe inclui: (i) mineração do Cd e Te como subproduto da mineração de Zn, Pb e Cu, e a fusão/refino de Zn, Pb e Cu; (ii) purificação de Cd e Te; (iii) produção de CdTe; (iv) fabricação dos módulos FV de CdTe; (v) transporte, instalação e comissionamento e implantação de módulos FV de CdTe em usinas de energia solar; e (vi) A desativação, transporte e reciclagem de módulos FV em CdTe no final de seu ciclo de vida.

Os sistemas FV de CdTe representam um risco para o Ambiente, Saúde ou Segurança (ASS) em condições normais de operação ou de possíveis acidentes, até o final de sua vida útil? Esta seção tem como objetivo apresentar informações que contribuam para responder a esta questão, com base em dados independentes obtidos a partir de uma amostra representativa de relatórios e estudos disponíveis publicamente. Apesar de não terem sido feitas investigações diretas em qualquer um dos aspectos relatados nesta seção, houve o cuidado de apresentar apenas as informações consideradas confiáveis. Algumas das informações apresentadas sobre os aspectos dos processos de produção industrial de CdTe foram obtidas diretamente da First Solar e uma visita técnica ao local da fábrica da First Solar em Perrysburg-OH, EUA, foi realizada em setembro de 2014. Esta visita técnica incluiu conversas com a equipe da First Solar no local e incluiu a verificação: dos processos de produção e reciclagem dos módulos de CdTe; do laboratório de testes de confiabilidade e qualidade dos módulos FV de CdTe; da planta de tratamento de esgoto própria; e sobre os esforços da First Solar relacionados a ASS. A First Solar assegura a autenticidade e validade de todos os dados fornecidos para este relatório.

2.1.1. Química e toxicidade do CdTe

O composto CdTe tem qualidades diferentes do que seus dois compostos elementares, cádmio e telúrio, considerados separadamente. Os estudos de toxicidade demonstram que CdTe é menos tóxico do que o Cd elementar, que é um agente carcinogênico para os pulmões, com efeitos prejudiciais de longo prazo também no fígado, rim e ossos devido à perda de cálcio, mas não muito se conhece sobre o composto CdTe [9,10,16,26]. O CdTe tem baixa toxicidade aguda por inalação, oral e aquática, e é negativo no teste de mutagenicidade de Ames¹². Com base na notificação desses resultados para a Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA - *European Chemicals Agency*), o CdTe já não é classificado como perigoso quando ingerido nem nocivo em contato com a pele, e sua classificação de toxicidade para a vida aquática foi reduzida [21]. Uma vez que seja capturado e encapsulado corretamente e com segurança, o CdTe utilizado em processos de fabricação pode ser inofensivo. Atualmente, os módulos de CdTe foram aprovados no teste da EPA (EUA) sobre o Procedimento de Lixiviação de Toxicidade Característica (PLTC), concebido para avaliar o potencial de lixiviação de longo prazo de produtos descartados em aterros [16]. Devido à forte ionicidade dos compostos de CdS e CdTe (72%) [40], a energia de qualquer fóton contida na luz solar é mais baixa do que a energia (> 5 eV) necessária para quebrar as ligações químicas no CdTe ou CdS. As fortes energias de ligação provocam uma estabilidade química e térmica extremamente alta, reduzindo o risco de degradação no desempenho FV ou de qualquer liberação de cádmio a um nível muito baixo, de forma que não é esperada degradação intrínseca do material [15].

Estudos toxicológicos revisados por Kaczmar sobre a toxicidade do CdTe [9] foram recentemente realizados com o objetivo de registrar o CdTe no âmbito do REACH na União Europeia e são brevemente apresentados na Figura 15.

¹² O teste de Ames é um ensaio biológico para avaliar o potencial mutagênico de compostos químicos (www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Ames_test.html).

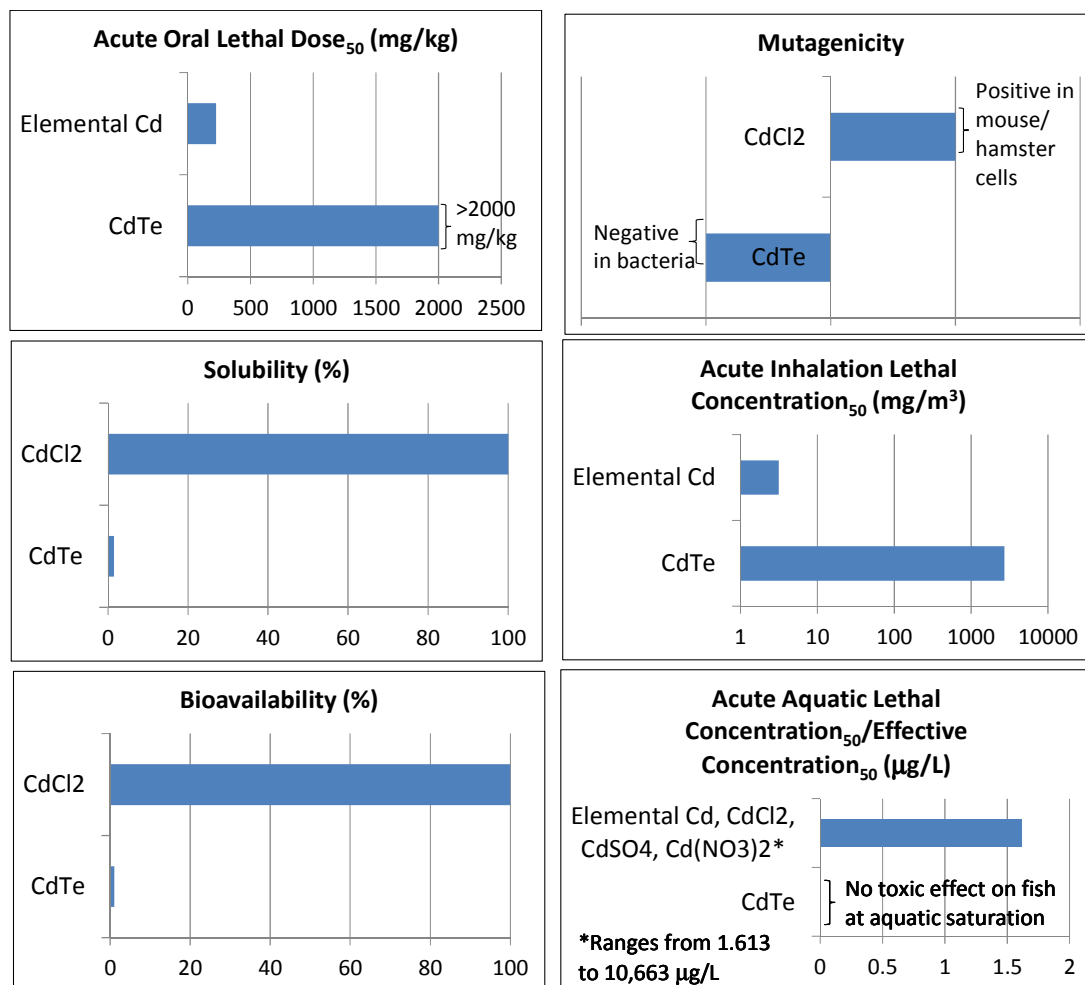


Figura 15: Toxicidade, solubilidade e biodisponibilidade do CdTe em comparação com outros compostos de Cd [9].

No processamento dos módulos FV de CdTe, a First Solar utiliza CdTe e CdS, que são os semicondutores ativos encapsulados entre as duas placas de vidro de 3,2 milímetros de espessura, e também CdCl₂, que é pulverizado sobre a camada de CdTe para promover o crescimento dos grãos e melhorar a eficiência de conversão FV. O CdTe e o CdS são compostos insolúveis, enquanto que o CdCl₂ tem uma solubilidade de 1400 g/L [26]. Após o processo de crescimento dos grãos, no entanto, o CdCl₂ é removido por lavagem e não faz parte do módulo FV finalizado. Os resíduos líquidos são tratados no local e testados para confirmar a conformidade aos limites permitidos, antes de serem descartados (ver Seção 2.4).

2.1.2. Fonte e Disponibilidade de matéria-prima

O cádmio (Cd) é um elemento metálico branco-azulado e macio, fazendo parte naturalmente da crosta terrestre e das águas e está presente em todos os lugares em nosso ambiente. Foi descoberto pela primeira vez na Alemanha, em 1817, como um subproduto do processo de refino do zinco

(Zn). Seu nome é derivado da palavra latina *cadmia* e da palavra grega *kadmeia*, que são nomes antigos para calamina ou óxido de zinco¹³.

O telúrio (Te) é um elemento quebradiço, levemente tóxico, raro, metalóide de cor branco-prateada, que é ocasionalmente encontrado na sua forma nativa, como cristais elementares. O telúrio é muito mais comum no universo como um todo do que na Terra. A sua extrema raridade na crosta da Terra, comparável à da platina (Pt), é em parte devido ao seu alto número atômico, mas também devido à sua formação como um hidreto volátil, o que fez com que o elemento fosse perdido para o espaço em forma de um gás durante a formação do planeta. O telúrio foi descoberto no Império Austro-Húngaro em 1782, em um mineral contendo telúrio (Te) e ouro (Au), e foi nomeado a partir da palavra latina para "Terra": *Tellus*. Os minerais AuTe são os mais notáveis compostos naturais de Au. No entanto, eles não são uma fonte comercial significativa de Te, que normalmente é extraído como um subproduto da produção de cobre (Cu) e chumbo (Pb)¹⁴.

Neste estudo, as questões ambientais, de saúde e de segurança (ASS) relacionados às fontes de matéria-prima na produção de módulos solares FV de CdTe são restritas ao próprio composto semicondutor CdTe ativo, uma vez que a partir do ponto de vista de ASS, este é o material que mais contém Cd do processo de produção do módulo FV de filme fino e também porque o CdS (material semicondutor ativo) e o CdCl₂ (utilizado no processo de crescimento de grãos e, em seguida, extraído por lavagem) contribuem, cada um, apenas com cerca de 4% da massa de CdTe utilizada na produção do módulo. O dispositivo FV semicondutor ativo é constituído de ambos os compostos CdTe e CdS, com espessuras de até 3 µm e 0,2 µm, respectivamente. Nos atuais módulos FV de CdTe da First Solar com eficiência de 15%, menos de 54g de Cd são usados por kWp (menos de 5,8 g de Cd por módulo individual com 0,72 m², o que é menor do que o conteúdo de Cd em duas pilhas AA recarregáveis de NiCd [41]).

O CdTe é fabricado a partir de Cd e Te puros e ambos são subprodutos da fundição de metais nobres (p.ex.: Cu, Zn, Pb e Au). O cádmio é gerado como um subproduto da fundição de minérios de Zn (~80%), minérios de Pb (~20%) e, em menor grau, de minérios de Cu. Telúrio é um subproduto do refino de Cu. O cádmio é usado principalmente em baterias NiCd. Seus usos anteriores em chapeamento anticorrosivo, pigmentos e estabilizadores foram reduzidos drasticamente. O cádmio é usado também no controle das hastes de reatores nucleares. O telúrio é um metal raro usado na fabricação de materiais fotossensíveis e catalisadores. Os minerais de cádmio não são encontrados apenas em depósitos comerciais. O principal mineral de Cd é a esferalita (ZnS), presente em ambos os minérios de Zn e Pb. Os minerais de telúrio não são encontrados apenas em depósitos comerciais. O telúrio é um

¹³ <http://www.cadmium.org>

¹⁴ <http://www.mindat.org/min-3906.html>

metal raro, que pode ser extraído como subproduto do processamento de Cu, Pb, Au, e minérios de Bi, e a maior parte do telúrio é recuperado a partir dos limos formados durante a refinação eletrolítica de Cu [41]. O CdTe é produzido a partir do Cd e Te em pó via métodos patenteados. O CdTe é produzido em pequenas quantidades para detectores e materiais FV. A produção é limitada e os volumes produzidos não são publicados. Supostamente, 100% da matéria-prima é utilizada e não há emissões quantificáveis durante a formação do CdTe. A purificação eletrolítica não produz quaisquer emissões e todos os resíduos são reciclados. As etapas de fusão e atomização necessárias para formar o pó de CdTe emitem cerca de 2% da matéria-prima que são capturados por filtros de ar particulado de alta eficiência (HEPA) [41].

O crescimento anual atual e projetado do mercado de energia solar FV, e a visão da energia solar se tornando parte relevante do mercado de geração de energia elétrica, irá envolver alguns terawatts de FV a serem instalados em todo o mundo antes de 2050. Neste contexto, a disponibilidade de matéria-prima para produção do módulo FV de CdTe pode se tornar um problema e a disponibilidade de Te é o aspecto mais crítico para o desenvolvimento desta tecnologia na escala de gigawatts. O uso atual de Te com espessura de 3 μm , em dispositivos FV de CdTe com 15% de eficiência está em torno de 67 MT/GWp, com perspectivas de redução considerável deste montante devido aos aumentos de eficiência e redução de espessura do filme [35,42,43]. Em 2010, a produção de módulos FV de CdTe foi responsável por cerca de 26% do consumo mundial de Te [42], e como um subproduto da fundição de Cu, a disponibilidade comercial do Te é declarada como restrita a 16-24 GWp/ano em 2020, 44-106 GWp/ano em 2050, e 60-161 GWp/ano em 2075 [43]. As projeções apresentadas na literatura não contaram com a obtenção de Te de novos minérios de BiTe, cordilheiras submarinas, ou maior refino de minérios diferentes do Cu [35].

2.1.3. Manufatura

Como mencionado anteriormente, a First Solar possui uma planta de fabricação de módulos FV de CdTe nos EUA (PBG) e Malásia (KLM) e os módulos FV integrados monoliticamente são produzidos a partir de vidro e acabados em um laminado vidro-vidro sem moldura pronto para uso. A Figura 16 mostra uma representação esquemática simplificada deste processo, no qual a deposição de semicondutores, definição de células FV e montagem final e testes do módulo FV pronto, são todos realizados na mesma planta de fabricação.



Figura 16: Fluxo conceitual e simplificado do processo de fabricação do módulo CdTe da First Solar, do vidro ao módulo FV finalizado, no qual todas as etapas do processo são realizadas na mesma planta de fabricação.

Por mais de duas décadas, originalmente como Solar Cells Inc. e desde 1999 como First Solar Inc., a empresa tem se empenhado na produção de módulos FV de CdTe. Durante este período, grande quantidade de dados foi acumulada em todas as etapas de exposição dos trabalhadores e do ambiente aos compostos de Cd utilizados para fabricar este produto. Um grande número de exames de acompanhamento médico rotineiros foram realizados nos trabalhadores da First Solar para acompanhar quaisquer respostas biológicas para as exposições ocupacionais ao Cd. De forma semelhante, um grande número de amostras de ar da planta industrial foram coletadas para determinar a exposição de Cd durante determinados processos de fabricação e procedimentos específicos de manutenção. Além disso, as emissões atmosféricas, emissões como efluentes industriais e resíduos sólidos foram medidos ou calculados usando estimativas de engenharia, tais como balanço de massa. O esforço de gestão do Cd é complementado por um abrangente sistema de gestão de segurança. O coração deste sistema é um processo formal de reconhecimento de perigos projetado para identificar e controlar proativamente os riscos no local de trabalho [44].

A First Solar dedica grande atenção à segurança, higiene industrial e saúde ocupacional dos funcionários e conduz um acompanhamento médico regular do pessoal envolvido em certas atividades de produção (por exemplo, um exame físico completo na adesão à empresa, além de análise periódica de sangue e urina). A First Solar também tem equipes de segurança de prontidão em cada fábrica. A First Solar estabeleceu um sistema de gestão ocupacional de saúde e segurança (OSS) (OHSAS 18001) para eliminar ou minimizar os riscos para os trabalhadores e terceiros que possam estar expostos a riscos associados às atividades de produção da empresa e reduziu a taxa de incidentes reportáveis (TIR) em suas fábricas de 2,6 em

2008 para 0,48 em 2014. Além disso, em termos de contaminação do ar por Cd, a empresa estabeleceu uma estratégia de amostragem de ar comparável globalmente numa base trimestral e sempre que houver uma nova planta ou um novo equipamento configurado, as potenciais áreas de exposição são barricadas e respiradores são necessários dentro das áreas barricadas até que a qualificação da amostragem seja feita e que controles de exposição comprovados estejam funcionando corretamente. A Figura 17 mostra os níveis médios de Cd na fábrica da Malásia, KLM, que estão bem abaixo do primeiro limite de ação da First Solar de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante certas atividades de manutenção, os níveis de Cd podem exceder o limite de ação. Durante essas atividades, os trabalhadores usam EPI's, como respiradores HEPA e macacões impermeáveis.

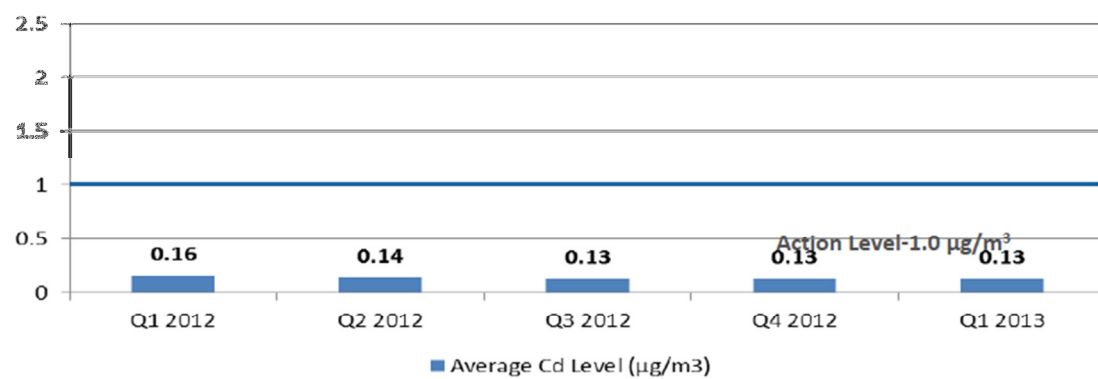


Figura 17: Níveis de Cd medidos rotineiramente na fábrica da First Solar na Malásia, KLM, os quais estão bem abaixo do limite de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A Figura 18 mostra os resultados de amostras de exposição pessoal ao Cd nos vários estágios do processo de fabricação nas plantas de módulos FV de CdTe da First Solar.

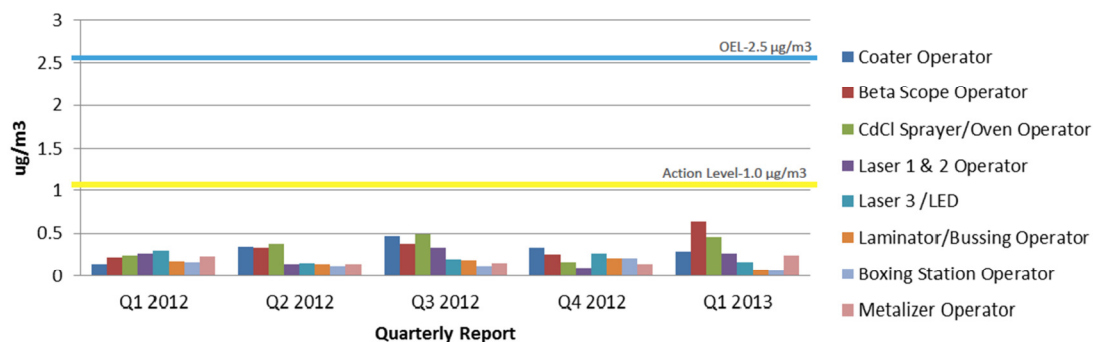


Figura 18: Exposição pessoal ao Cd nos vários estágios do processo de fabricação nas plantas de módulos FV de CdTe da First Solar.

A First Solar tem acumulado vários anos de biomonitoramento e dados de higiene industrial, que estão bem abaixo dos limites regulamentares, e que validam o excelente controle da empresa na exposição de Cd. A Figura 19 mostra os resultados de biomonitoramento nas plantas de fabricação da First Solar em Perrysburg (em cima) e Malásia (embaixo), onde os níveis médios de Cd no sangue e urina dos funcionários estão bem abaixo dos limites de exposição de saúde ocupacional da *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA).

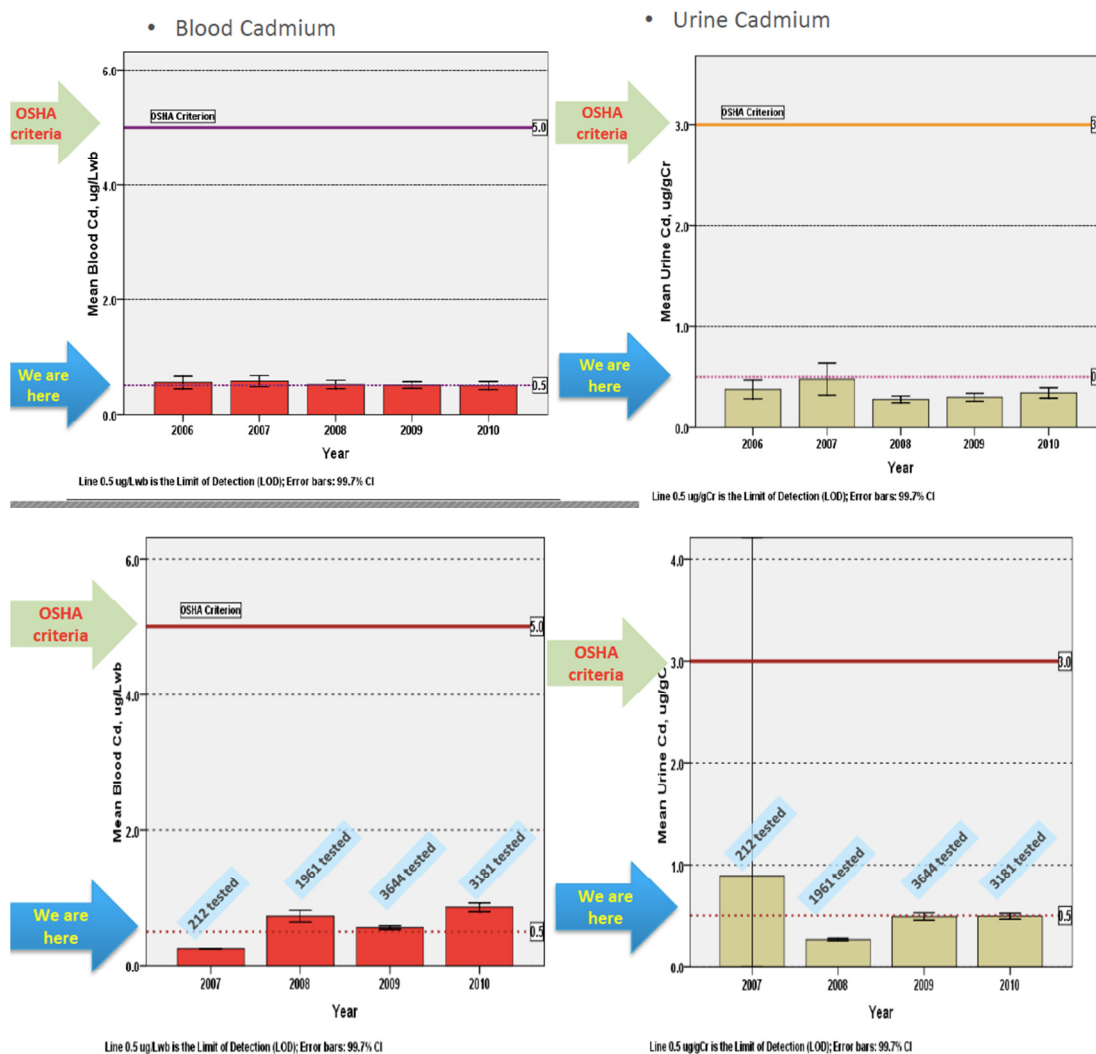


Figura 19: Resultados de biomonitoramento dos trabalhadores da planta de módulos FV da First Solar em Perrysburg-EUA (acima) e na Malásia (abaixo).

A Figura 20 mostra uma comparação entre os funcionários, estagiários e empregados fixos na planta de fabricação do módulo FV de CdTe da First Solar na Malásia (KLM), do conteúdo de Cd no sangue (em cima) e na urina (embaixo) para o ano de 2010, dividido pelo hábito de fumar. Um total de 3.181 funcionários foram testados (1.253 estagiários e 2.458 empregados).

Não há diferença estatisticamente significativa entre a concentração de Cd de estagiários e empregados, mas uma nítida diferença pode ser observada entre o teor de Cd no sangue de fumantes e não-fumantes.

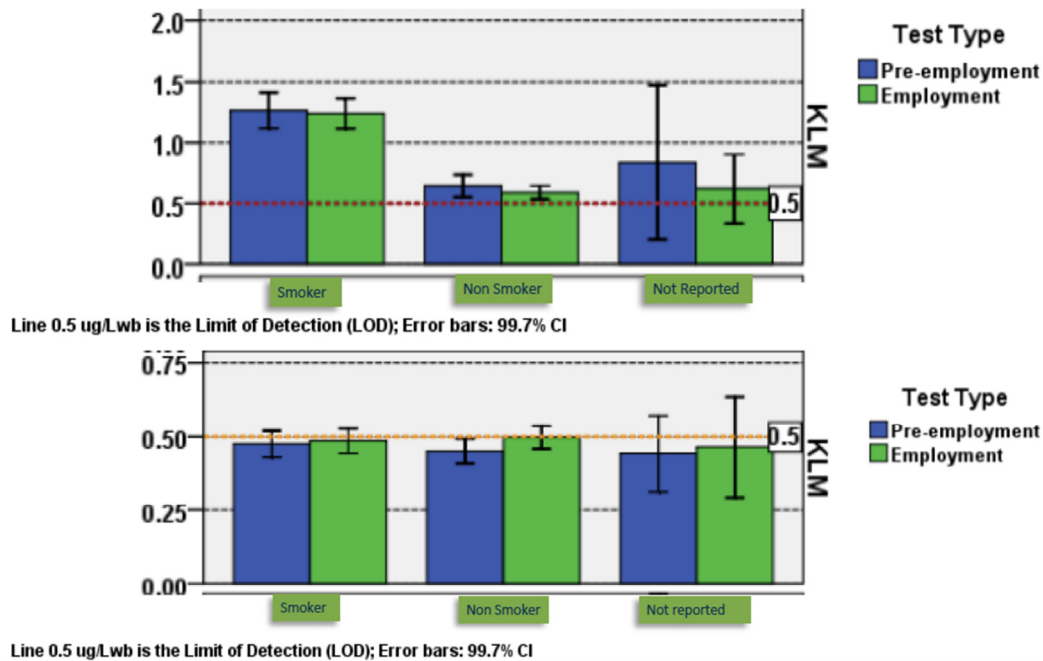


Figura 20: Avaliação anual do conteúdo de Cd no sangue (gráfico superior) e na urina (gráfico inferior) dos trabalhadores da planta de produção de módulos FV de CdTe da First Solar na Malásia (KLM) no exame admissional (pré-emprego) e após a contratação (já empregados), para o ano de 2010, dividido pelo hábito de fumar. Um total de 3.181 funcionários foram testados (1253 pré-emprego, e 2.458 empregados).

A First Solar começou, recentemente, a considerar a possibilidade de transferir parte das etapas de fabricação dos seus módulos FV de CdTe para outros países, a fim de satisfazer algumas necessidades de conteúdo local em novos mercados como o Brasil. O conceito da chamada *Split Line* foi proposto na First Solar e é mostrado esquematicamente na Figura 21. Espera-se que, tal como nas plantas de fabricação atuais, todas as novas instalações da First Solar irão observar os mesmos rigorosos critérios de Impacto Ambiental, Saúde e Segurança (IASS).



Figura 21: Fluxo conceitual e simplificado do processo de fabricação do módulo CdTe da First Solar, com divisão de linhas de produção (*Split Line*) do vidro ao módulo FV finalizado, no qual algumas das etapas iniciais do processo são realizadas na planta matriz (PBG ou KLM) e módulos de vidro simples com células completas são empacotados e enviados a outros lugares para a montagem final e teste em outra fábrica.

Do ponto de vista do Impacto Ambiental, Saúde e Segurança (IASS), a fabricação de módulos FV de CdTe na First Solar é realizada de uma maneira controlada e responsável. Os processos de aquisição de matérias-primas para a fabricação dos módulos são todos realizados em um ambiente fechado. Os poluentes atmosféricos gerados entram, geralmente, no sistema de ventilação destes ambientes, que são equipados com filtros de ar particulado de alta eficiência (HEPA). A eficiência dos filtros HEPA na coleta de partículas de diâmetro médio de 0,3 μm é de 99,97%. A limpeza dos resíduos líquidos de todas as seções da fábrica é realizada em uma estação central própria de tratamento de água. Deste modo, os resíduos aquosos e emissões no ar gerados no local são efetivamente controlados. O tratamento e uso da água são abordados na seção 2.4.

2.1.4. Uso do produto

Alegou-se que a geração de eletricidade com sistemas FV de filme fino de CdTe é uma forma eficaz de reduzir o teor de Cd lançado no meio ambiente (ver seção 2.2) [11,45]. Esta lógica é baseada em dois fatos principais:

- (i) A substituição da geração de energia elétrica a partir do carvão pela eletricidade gerada com sistemas FV de CdTe resulta em menos Cd lançado no ambiente, já que o carvão contém Cd (140 g de Cd lançado para cada GWh de eletricidade produzida nos EUA [46]), que é inevitavelmente liberado no ambiente em usinas alimentadas a carvão. Em sistemas FV de CdTe, por outro lado, a maior parte do Cd envolvido é encapsulado no interior do laminado de vidro-vidro. No final de sua vida útil ou quando são acidentalmente quebrados, os módulos FV de CdTe podem ser

descartados em aterros, uma vez que eles passaram no Procedimento de Toxicidade Característica por Lixiviação¹⁵ do governo federal dos EUA (critérios de lixiviação PTCL para resíduos não perigosos) [12]; e

- (ii) Por ser um subproduto da mineração e refino de Zn, e porque o Zn é produzido em grandes quantidades, quantidades substanciais de Cd são geradas como um inevitável subproduto, não importando quanto Cd é utilizado em FV. Este Cd pode ser aplicado em usos benéficos ou pode ser descartado no meio ambiente. Quando o mercado não absorve o Cd gerado pelas fundições e refinarias de metal, ele é cimentado e enterrado, armazenado para uso futuro, ou descartado em aterros como resíduos. Assim, provavelmente, encapsular o Cd como CdTe em módulos FV apresenta uma forma mais segura de utilização do que seus usos tradicionais e é muito mais interessante do que simplesmente descartá-lo [11].

Um módulo FV pode sofrer uma ruptura em qualquer fase de sua vida útil, desde o transporte, instalação, operação e manutenção, até as operações de desativação. Todas as etapas envolvem a manipulação ou a exposição a condições que podem resultar em danos à superfície do módulo (por exemplo, chuvas de granizo em determinadas áreas). As taxas medidas de ruptura de módulos são muito baixas na experiência da First Solar com mais de 2.000 MWp de sistemas FV de CdTe que operam nos EUA, apresentando uma média de 0,04% ao ano [47]. O composto CdTe permanecerá estável como um composto sólido sob condições de operação normais. Em caso de quebra dos módulos FV, uma degradação química é improvável devido à baixa pressão de vapor e baixa solubilidade deste composto e devido ao design do produto. Nos módulos solares FV da First Solar, o CdTe é laminado entre duas folhas de vidro com um adesivo polimérico industrial, que irá impedir a delaminação, se um módulo rachar. Mesmo no pior cenário de quebra, os potenciais impactos para o solo, águas subterrâneas e ar, a partir de módulos quebrados, estão dentro de níveis aceitáveis para a saúde humana e para níveis de segurança [47].

O fogo é uma preocupação comum durante a etapa de utilização do produto, e uma análise experimental indica que os módulos de CdTe não representam um risco significativo durante incêndios. Sob as altas temperaturas de um incêndio em um edifício (800 a 1100°C), o vidro do módulo funde, com o Cd difundindo-se no vidro e limitando as emissões [48]. Potenciais impactos na

¹⁵ TCLP é um teste de caracterização dos resíduos perigosos dos EUA. Segundo a legislação brasileira, os resíduos contendo Pb ou Cd são listados como resíduos perigosos, independentemente do volume do produto químico que contém (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, através da NBR 10004:2004). Já que os compostos de Pb e/ou Cd são comumente usados em módulos comerciais FV [9], esses módulos são susceptíveis de serem caracterizados como resíduos perigosos ao final de sua vida útil se forem descartados no Brasil. No entanto, eles não serão classificados como resíduos ou resíduos perigosos, nos termos da legislação brasileira, caso eles não sejam descartados no Brasil (p. ex.: caso sejam transportados para fora do Brasil para reciclagem).

qualidade do ar por incêndios de módulos FV de CdTe têm sido considerados abaixo dos níveis de segurança para a saúde humana [49].

2.1.5. Descarte e reciclagem do produto ao final de sua vida útil

A reciclagem é a forma ideal de descarte de módulos FV de CdTe no final de sua vida útil, bem como dos módulos quebrados/rachados em campo, ou até mesmo dos módulos fora de especificação ou ainda dos módulos danificados durante o processo de fabricação. A First Solar estabeleceu um abrangente processo de reciclagem em 2005, com instalações de reciclagem operacionais em todas as suas fábricas, com uma capacidade anual de reciclagem de cerca de 26.000 MT. A Figura 22 mostra o fluxo do processo de reciclagem dos módulos FV da First Solar, que consiste em uma máquina trituradora; moedor; reator de coluna, onde os fragmentos dos módulos FV são misturados com uma solução ácida para separar os materiais semicondutores do vidro sólido e do encapsulante; e um recipiente de precipitação do metal. Após precipitação e prensagem de filtros, as massas ricas em Cd e Te são enviadas para terceirizados para refino e recuperação de Cd e Te, com até 95% dos metais recuperados. O vidro triturado é enviado para um terceiro, com 90% de recuperação, onde ele é utilizado para produzir novos produtos de vidro. O encapsulante é eliminado de acordo com as normas locais de descarte de resíduos ou incinerado para recuperação da energia.

Emissões ao meio ambiente podem, potencialmente, ocorrer após a desativação apenas se esses módulos forem depositados em aterros sem forro e sem a coleta de lixiviados, além de sistema de tratamento, admitindo-se que os compostos de cádmio vazem. No entanto, como o CdTe é encapsulado entre duas folhas de vidro, torna-se improvável que ocorra lixiviação para o ambiente sob condições normais [26,50].

A partir de 2014, o quadro regulamentar da União Europeia sobre Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (REEE UE) obriga a reciclagem de todas as tecnologias de módulos FV, com metas de coleta e recuperação, bem como exigências mínimas para seu tratamento. A reciclagem de módulos FV é um negócio crescente e potencialmente lucrativo, e com a inclusão dos módulos FV na Diretiva REEE da UE, a First Solar projetou o plano de negócios para lucrar cerca de 17,5 bilhões de euros em toda a indústria em 2050, pois os custos de reciclagem se reduzem com o aumento de volume, como mostra a Figura 23.

Revisão Científica da Literatura sobre a Tecnologia Fotovoltaica de Filmes Finos de CdTe
 Avaliação dos impactos e benefícios da tecnologia solar fotovoltaica de CdTe da First Solar para aplicações de grande porte no Brasil: desempenho, impactos ambientais e à saúde e segurança

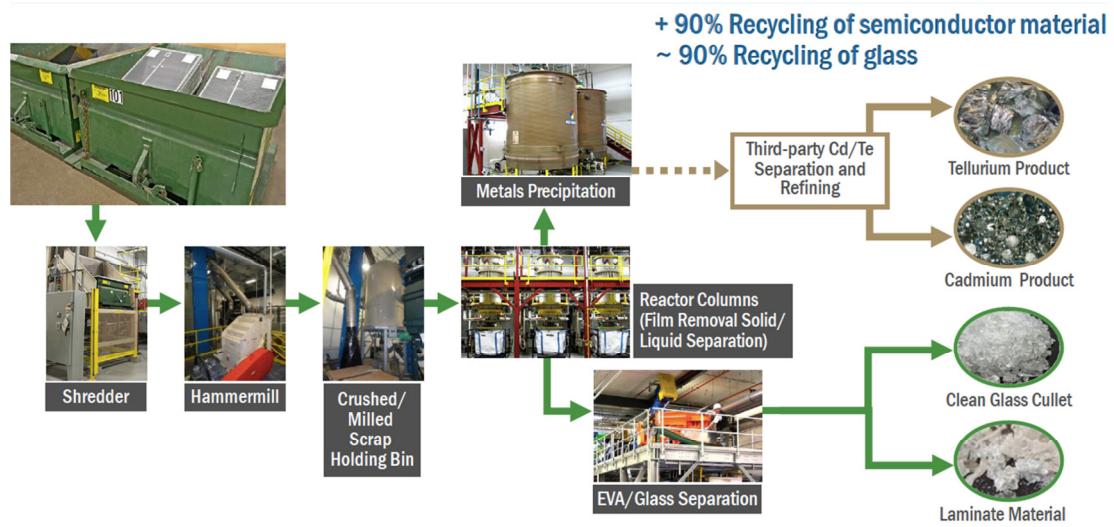


Figura 22: Fluxo do processo de reciclagem de módulos FV de CdTe da First Solar. Após precipitação de metal realizada na própria fábrica, a separação e o refino de Cd e Te são feitos por terceiros.

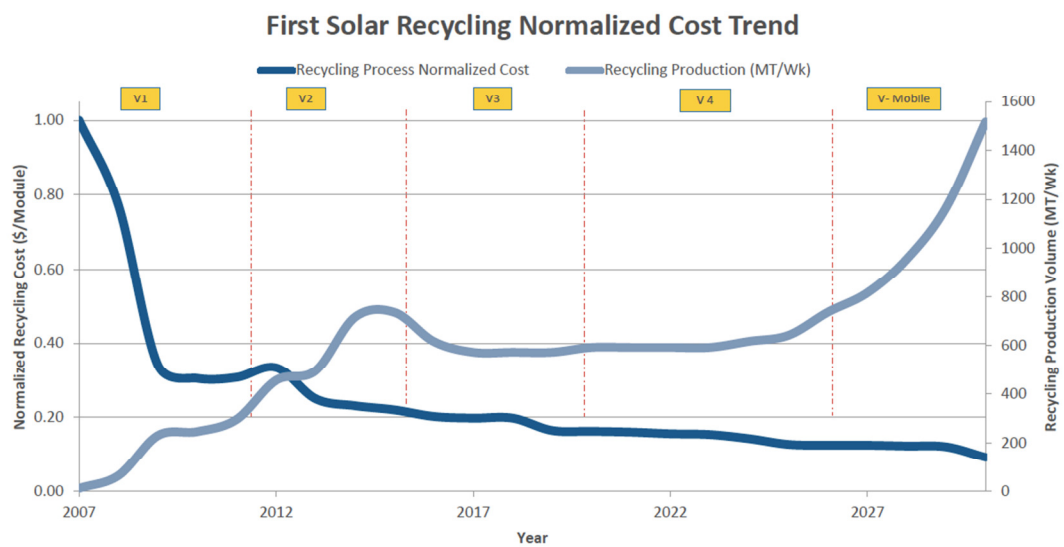


Figura 23: Evolução dos custos de reciclagem normalizados (US\$/módulo) para o processo de reciclagem de módulos FV de CdTe da First Solar. A versão V2 está atualmente em vigor, e a V3 deverá entrar em linha em breve.

2.2. Pegada de Carbono, Tempo de Retorno Energético e Emissões de Metais Pesados

As plantas solares FV de CdTe não irão aumentar a poluição por metais pesados no ambiente durante as fases normais de instalação e operação, mas pode ocorrer poluição por Cd na atmosfera durante as fases iniciais, incluindo mineração, trituração do minério, torrefação, fundição e refino. Estudos relevantes da First Solar mostram que a poluição por Cd no ambiente atmosférico pode, potencialmente, ser gerada durante a fabricação de módulos solares FV, especialmente nas etapas de produção do filme fino e crescimento de cristais, e na fase de execução da definição das células individuais com laser. A exaustão dos processos contendo cádmio é geralmente eliminada de uma forma compatível após a coleta de poeira, utilizando 99,97% de eficiência dos filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air), conforme mostrado na Figura 24. Os poluentes residuais contendo Cd na exaustão após a coleta de poeira são recirculados dentro das instalações com concentrações médias de Cd no ar interior da fábrica ($<0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que estão bem abaixo dos limites de exposição ocupacional ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

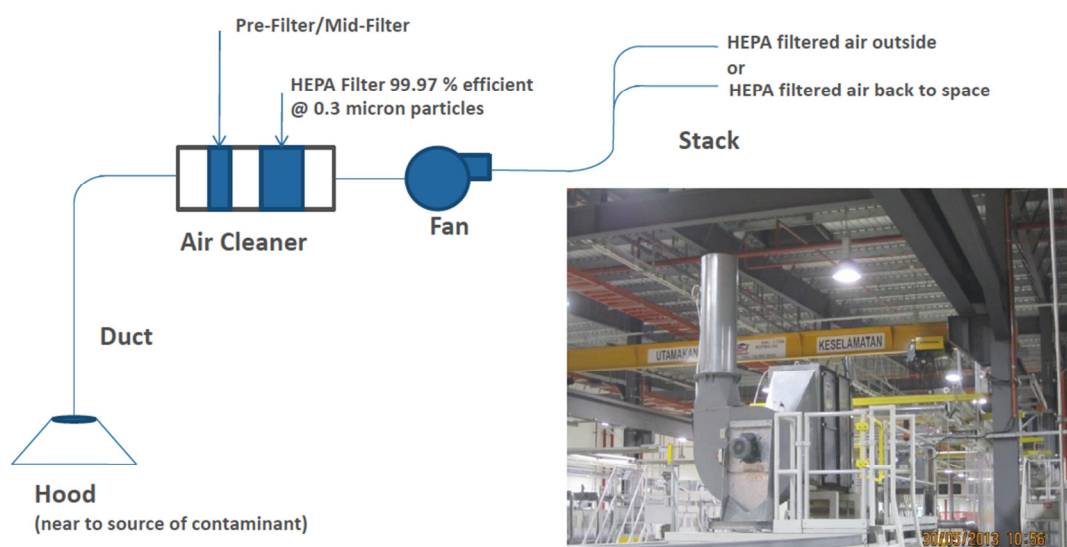


Figura 24: Sistema de ventilação de exaustão local (VEL) da planta de fabricação de módulos FV de CdTe da First Solar. A foto mostra o ar de exaustão do filtro HEPA (High Efficiency Particulate Air) sendo recirculado de volta para o espaço de chão de fábrica.

Os efeitos do Cd no ambiente sobre a saúde humana foram revisados por Han *et al.* [51], que concluíram que é importante (i) continuar a realizar estudos de acompanhamento e analisar as tendências sobre os perigos para a saúde, a fim de avaliar a exposição ao Cd e a gravidade dos danos relacionados à saúde; (ii) coletar e analisar as informações sobre doença e morte da população intimamente relacionada à exposição ao Cd e estudar a relação dose-resposta entre o dano renal e a exposição ao Cd; (iii) estabelecer um monitoramento do perigo à saúde humana e uma rede de

alerta rápido de exposição ao Cd no âmbito da vigilância ambiental e da saúde pública; (iv) aplicar a pesquisa, prevenção e intervenção sobre riscos à saúde para a população exposta ao Cd no ambiente para reduzir os riscos de contaminação. Como já mencionado, as emissões potenciais da mineração e refino de Zn e Pb ocorrem independentemente do uso de seus subprodutos na FV [41].

Na Figura 25, Fthenakis et al. [45] compararam o ciclo de vida atmosférico das emissões de Cd de sistemas FV com outras fontes de geração de eletricidade, mostrando que a geração de energia elétrica em sistemas FV de CdTe irá liberar menos de dez vezes Cd no meio ambiente, do que a produção de energia elétrica em uma usina a carvão.

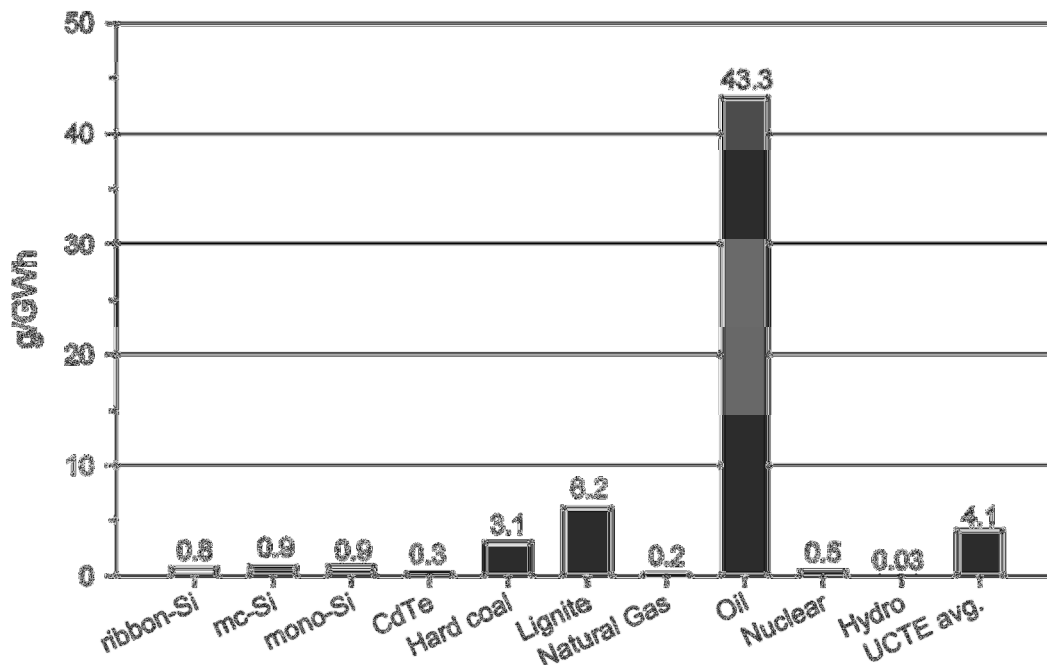


Figura 25: Emissões atmosféricas de Cd ao longo do ciclo de vida para sistemas FV montados em solo, considerando o consumo de eletricidade e combustível para uma irradiação média de 1.700 kWh/m²/ano no Sul da Europa, taxa de desempenho (PR, *performance ratio*) de 0,8 e vida útil de 30 anos [45].

O Tempo de Retorno Energético (TRE) das tecnologias solares FV comerciais disponíveis é mostrado na Figura 26. Para todas as tecnologias FV, a energia envolvida na produção dos módulos solares é devolvida muitas vezes ao longo da vida útil de um gerador solar FV. Devido aos seus requisitos de baixa energia, a manufatura de módulos FV de CdTe apresenta o menor TRE da indústria FV.

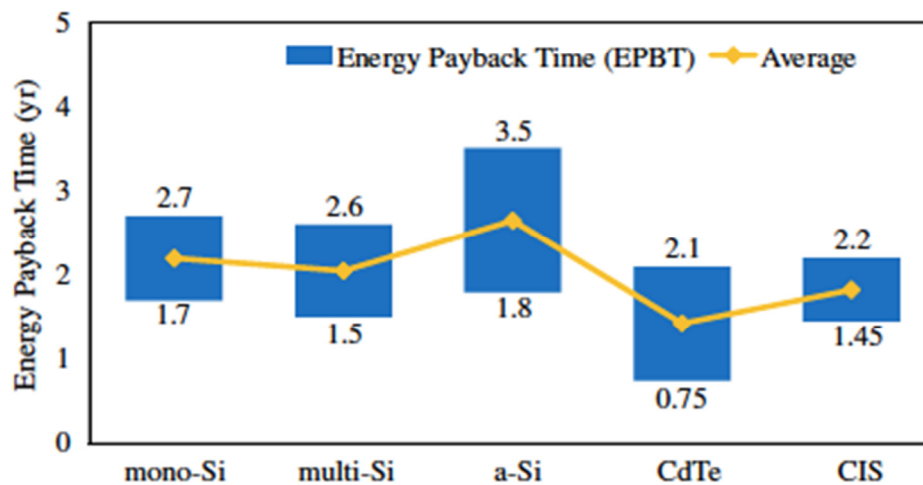


Figura 26: Tempo de retorno energético (em anos) para tecnologias FV comercialmente disponíveis [52].

Uma análise da SimaPro LCA da pegada de carbono foi realizada pela First Solar para usinas solares usando módulos FV de CdTe com eficiência de 15% da First Solar operando no Brasil¹⁶ para diferentes combinações de produtividade (*yield*) rendimento anual ótimo (2.000 e 2.300 kWh/kWp/ano), 80% de taxa de desempenho (PR, *performance ratio*), degradação anual (0,5 e 0,7% ao ano), e vida útil das usinas solares FV (25 e 30 anos). Os valores da pegada de CO₂ para os sistemas FV de CdTe da First Solar variaram de 11,9 a 16,6 g CO₂-eq/kWh para módulos FV produzidos usando a matriz energética dos EUA, e 9,6 a 13,4 g CO₂-eq/kWh para módulos FV produzidos utilizando a matriz energética brasileira. O tempo de retorno energético (TER) para usinas da First Solar de CdTe operando no Brasil variou de 0,82 a 0,94 anos, nos locais mais ensolarados, e ficou em 1,22 anos sob as piores condições possíveis de irradiação solar no país. Os valores da pegada de CO₂ para o silício cristalino FV, por outro lado, são consideravelmente mais elevados, variando de 30 a 60 g CO₂-eq/kWh para o silício multi e monocristalino, respectivamente, e uma TER de 1,82 a 3,07 anos, respectivamente.

2.3. Uso do solo e biodiversidade

As fontes de energia renováveis são tipicamente dispersas e difíceis de coletar, exigindo, portanto, áreas de solo substanciais em comparação com fontes de energia convencionais. Fthenakis e Kim [53] apresentaram as necessidades normalizadas de solo durante o ciclo de vida para as opções de energia convencional e renovável, abrangendo as fontes carvão, gás natural, nuclear, hidrelétrica, FV, eólica e biomassa. Eles compararam a transformação do solo e matrizes de ocupação do solo considerando os

¹⁶ Admitindo a atual matriz brasileira de geração de eletricidade e uma eficiência de T&D de 64%.

ciclos de vida daqueles energéticos. Embora as estimativas variem de acordo com as condições regionais e tecnológicas, o ciclo FV requer a menor quantidade de solo entre as opções de energia renovável, enquanto que o ciclo de biomassa requer a maior quantidade. Além disso, determinaram que, na maioria dos casos, sistemas FV montados no solo, em áreas de alta insolação, ocupam ou alteram menos solo do que o ciclo do carvão combustível combinado com a mineração da superfície. Em termos de ocupação do solo, o ciclo de combustível da biomassa requer a maior quantidade, seguido pelo ciclo do combustível nuclear.

A tecnologia solar FV é uma tecnologia de geração de energia com uso intensivo de área, e módulos FV com eficiência de conversão de 15% instalados lado a lado em uma superfície horizontal levarão a uma potência nominal de 150 W/m² (6.667 m²/MWp). No entanto, também se faz necessária área de solo, não apenas para acomodar os módulos FV, mas também para o acesso, manutenção e também para evitar sombreamento. Nos locais de baixa latitude no Brasil, onde a maior parte dos parques solares FV serão instalados, os módulos FV serão montados em estruturas fixas ou móveis de metal, inclinados tipicamente em 10° e apontando para o Norte verdadeiro, ou em estruturas de rastreamento de eixo único. Para geradores FV fixos, o espaçamento entre módulos e a distância entre as fileiras de módulos (uma distância típica é de 2,5 m) levará a requisitos de área de cerca de 14.000 m²/MWp.

O maior potencial impacto das usinas de energia solar FV para a vida selvagem e seu habitat é devido à ocupação do solo pela própria usina de energia solar. Se a usina de energia solar for delimitada por uma cerca, isso afetará esconderijos, estratégia de caça, e disponibilidade de alimentos. As usinas de energia também podem impedir o crescimento da vegetação, levando à possibilidade de uma alteração significativa na vegetação. Os geradores FV em si irão lançar sombras e podem alterar o microclima, causando efeitos sobre a vegetação que não tenham sido previamente estudados. A instalação de uma usina de energia FV pode envolver a supressão de vegetação em áreas de desenvolvimento, com a retirada da cobertura vegetal do solo favorecendo processos erosivos. Na maioria das regiões onde as usinas solares FV são mais prováveis de serem instaladas no Brasil, a terra não é particularmente adequada para atividades agrícolas, e não está previsto que as usinas FV irão competir com a produção agrícola ou pecuária, ou ainda levar à remoção de florestas nestes 8,5 milhões de quilômetros quadrados do país. No entanto, o impacto para a vida selvagem será fortemente correlacionado com a biodiversidade da terra em que a usina de energia solar será construída. A luz solar e disponibilidade de água pode alterar significativamente a biodiversidade em qualquer um desses biomas. Consequentemente, um estudo personalizado da vida selvagem e do ecossistema ao redor de cada usina é recomendado como uma boa prática. Além dos potenciais impactos sobre a biodiversidade, projetos de energia solar podem ter benefícios para a biodiversidade devido ao seu uso estático de terra [26]. Embora os projetos de construção sempre envolvam a

perturbação da flora e da fauna existentes, com parques solares existe uma chance de melhorar a qualidade de habitats para várias espécies de plantas e animais e até mesmo a criação de novos habitats [54]. A Tabela 2 resume os impactos ecológicos de usinas de energia solar ao substituir a geração de energia pelas tecnologias tradicionais nos Estados Unidos.

Tabela 2: Impactos sobre a saúde e o bem-estar humanos (em cima) e sobre os animais selvagens e seu habitat (parte inferior) da geração de eletricidade solar em relação à geração de energia tradicional dos EUA [55].

Impact category	Effect relative to traditional power	Beneficial or detrimental	Priority	Comments
Exposure to hazardous chemicals				
Emissions of mercury	Reduces emissions	Beneficial	Moderate	Solar emits ~30× less
Emissions of cadmium	Reduces emissions	Beneficial	High	Solar emits ~150× less cadmium
Emissions of other toxics	Reduces emissions	Beneficial	Moderate	Solar emits much less
Emissions of particulates	Reduces emissions	Beneficial	High	Solar emits much less
Other impacts				
Noise	Reduces noise	Beneficial	Low	Less mining noise; less train noise
Recreational resources	Reduces pollution	Beneficial	Moderate	Cleaner air; cleaner fishing
Visual aesthetics	Similar to fossils	Neutral	Moderate	Solar farms vs. open pit mines
Climate change ^a	Reduces change	Beneficial	High	Solar emits ~25× less g h g
Land occupation	Similar to fossils	Neutral	Moderate	See Section 4.1

Impact category	Effect relative to traditional power	Beneficial or detrimental	Priority	Comments
Exposure to hazardous chemicals				
Acid rain: SO NOx	Reduces emissions	Beneficial	Moderate	Solar power emits ~25× less
Nitrogen, eutrophication	Reduces emissions	Beneficial	Moderate	Solar emits much less
Mercury	Reduces emissions	Beneficial	Moderate	Solar emits ~30× less
Other: e.g., Cd, Pb, particulates	Reduces emissions	Beneficial	Moderate	Solar emits much less
Oil spills	Reduces risk	Beneficial	High	Note: BP Horizon Spill, Valdez Spill
Physical dangers				
Cooling water intake hazards	Eliminates hazard	Beneficial	Moderate	Thermoelectric cooling is relegated
Birds: flight hazards	Transmission lines	Detrimental	Low	Solar needs additional transmission line
Roadway and railway hazard	Reduces hazard	Beneficial	Low	Road and railway kill is likely reduced
Habitat				
Habitat fragmentation	Neutral	Neutral	Moderate	Needs research and observation
Local habitat quality	Reduces mining	Beneficial	Moderate	Mining vs. solar farms; needs research
Land transformation	Neutral	Neutral	Moderate	Needs research and observation
Climate change ^a	Reduce change	Beneficial	High	Solar emits ~25× less greenhouse gases

2.4. Uso da água, tratamento e descarte de resíduos líquidos

O uso de água na geração de eletricidade com FV em geral, e com o filme fino de CdTe, em especial, foi analisado por Fthenakis *et al.* e Sinha *et al.* [3,4], respectivamente e eles descobriram que, em qualquer caso, a eletricidade gerada por FV envolve um menor consumo e retirada de água do ambiente do que qualquer um dos métodos convencionais e do que a maior parte das alternativas de geração de energia renováveis, exceto a eólica.

A preparação e processamento industrial de módulos FV de CdTe envolvem os compostos de Cádmio: CdTe, CdS e CdCl₂. A água descartada pela First Solar contém até 30 ppm de Cd e a tecnologia padrão de precipitação de metais remove o Cd em cerca de 100 ppb. A First Solar acrescenta as tecnologias de filtração e troca iônica para reduzir os níveis de Cd para menos de 20 ppb. Os sistemas de descarte de resíduos líquidos operam em modo de descarga por lotes. Após o tratamento, água é coletada em tanques de retenção, que são amostrados e testados, previamente ao descarte, para garantir a conformidade aos limites permitidos e se não estiver em conformidade, a água é enviada novamente para tratamento interno. As fábricas da First Solar são equipadas com capacidade de análise de última geração para o teste de Cd na água em suas instalações. A Figura 27 mostra

um diagrama de fluxo do processo de tratamento das águas residuais nas fábricas da First Solar e a Figura 28 mostra alguns dos equipamentos utilizados na planta de tratamento de resíduos líquidos dedicada da First Solar.

De 2009 a 2013, a First Solar reduziu a quantidade de água necessária para a fabricação de módulos FV de CdTe de 1,87 para 1,46 litros por Wp. Note-se que a retirada de água para a fabricação de módulos FV de CdTe é inferior à usada na fabricação de módulos FV de c-Si devido ao menor consumo de energia e uso de material no processo de fabricação intensivo [3].

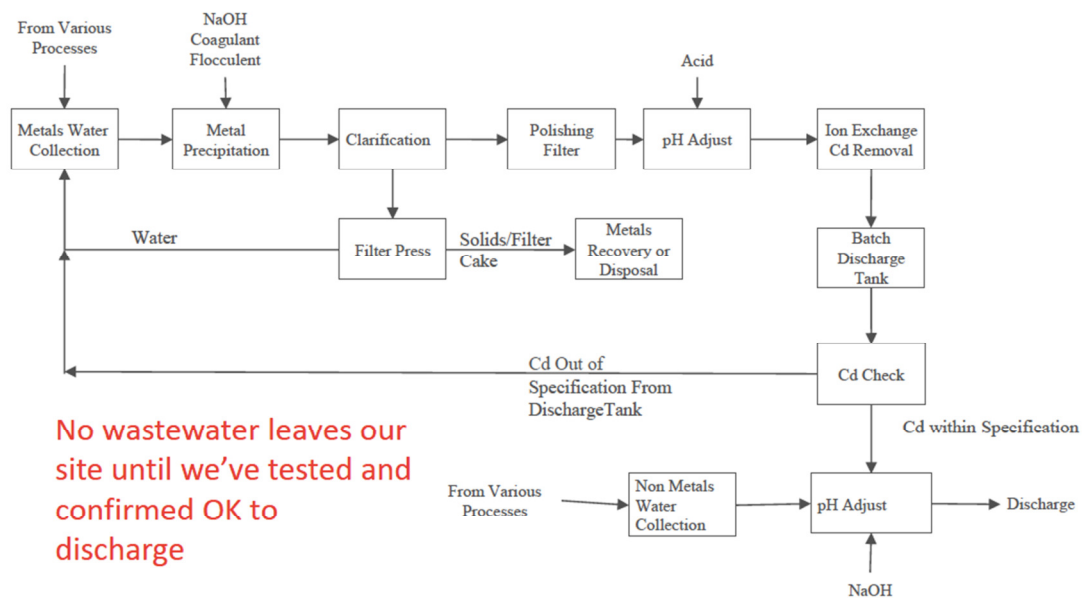


Figura 27: Diagrama de fluxo de processo do tratamento de águas residuais nas fábricas First Solar.



Figura 28: Equipamentos utilizados pela First Solar na planta dedicada ao tratamento de águas residuais.

Após tratamento, o balanço de massa de Cd na First Solar indica que menos de 0,02% do total de Cd que entrou é liberado na água, o que está bem abaixo dos limites de descarte final regulamentados.

3. Aspectos de desempenho de sistemas FV em climas quentes

Menos de 10% dos sistemas FV instalados em todo o mundo estão localizados em regiões tropicais [56]. Com condições de irradiância favoráveis e as reduções de custos observadas nas tecnologias FV nos últimos anos, espera-se que as instalações nestas áreas do mundo cresçam substancialmente em um futuro próximo. A irradiância, temperatura da célula FV em operação e o conteúdo espectral da luz solar são os três parâmetros mais relevantes que afetam o desempenho dos dispositivos FV em campo e eles podem variar consideravelmente de um local para outro, dependendo se uma usina de energia solar FV opera nos mercados FV mais tradicionais de clima temperado ou em locais quentes e ensolarados. Mesmo em locais ensolarados, com disponibilidade de recursos de irradiação solar semelhante, as velocidades do vento influenciam consideravelmente as temperaturas de operação do módulo e devem ser levadas em conta. Além disso, as questões relativas ao acúmulo de sujeira (do inglês *soiling*) são uma preocupação muito maior em climas quentes e ensolarados e à medida em que diferentes locais áridos e desérticos ao redor do mundo começam a implantar sistemas FV em volumes maiores, o acúmulo de sujeira precisa ser abordado com maior cuidado.

3.1. Desempenho FV de CdTe em climas quentes e úmidos

Devido às características intrínsecas do material, o filme fino de CdTe e o a-Si foram relatados como apresentando desempenho superior em campo para climas ensolarados e quentes [57,58]. Com os avanços consideráveis que a tecnologia FV de CdTe obteve, tanto em termos de aumento de eficiência quanto em redução de custos de produção, os módulos FV de CdTe comerciais têm, atualmente, o dobro da eficiência da sua contraparte de a-Si. À medida que as temperaturas em campo aumentam, todos os dispositivos FV sofrem perdas de desempenho, e, dentre as tecnologias FV comercialmente disponíveis, o CdTe e o a-Si são aqueles com os menores valores para o coeficiente de temperatura de potência, que são: de -0,25 a -0,34%/°C para o CdTe [59] e de -0,10 a -0,20%/°C para o a-Si [36]. As tecnologias FV mais tradicionais de silício cristalino têm coeficientes de temperatura que variam de -0,45 e -0,50%/°C, e, portanto, poderão sofrer até o dobro das perdas de desempenho de suas contrapartes de filme fino. A Figura 29 mostra a distribuição das temperaturas ambiente e das costas do módulo medidos em um sistema FV da First Solar numa área desértica do sudoeste dos EUA.

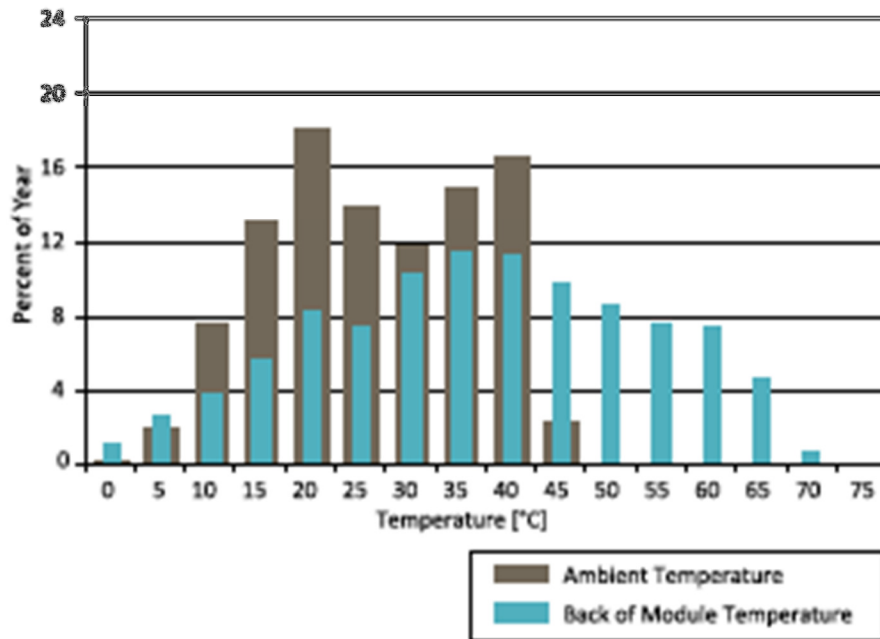


Figura 29: Distribuição das temperaturas do ambiente e das costas dos módulos FV, medidos em um sistema FV da First Solar numa área desértica no sudoeste dos EUA [58].

A Figura 30 mostra a distribuição da fração da produção de energia em função das temperaturas das costas do módulo para a primeira usina de energia solar FV operando numa área desértica no sudoeste dos EUA.

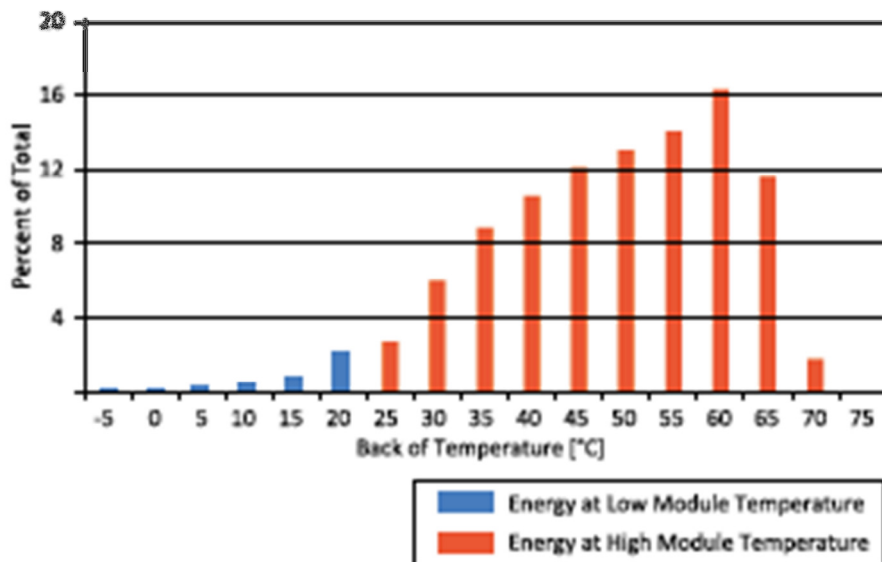


Figura 30: Distribuição da fração da produção de energia em função da temperatura das costas do módulo para uma usina FV da First Solar operando numa área desértica no sudoeste dos EUA [58].

Estes dados mostram que existe uma considerável parcela de tempo e energia gerada por um sistema FV em um clima quente que é produzida em

condições de temperatura muito acima das Condições Padrão de Teste (CPT) de 25°C de uma célula FV. Embora essas condições indiquem uma expectativa de desempenho superior de dispositivos FV de CdTe da First Solar do ponto de vista da característica dos semicondutores, elas são também um desafio do ponto de vista de outros mecanismos de falha do dispositivo FV e a First Solar espera ter taxas um pouco mais altas de falha de garantia em climas com elevadas temperaturas. A First Solar recomenda uma taxa de degradação a longo prazo de -0,7%/ano na modelagem de sistemas CdTe em climas quentes, ao invés dos -0,5%/ano recomendados em climas mais temperados [58]. A First Solar introduziu, recentemente, uma nova estrutura do dispositivo FV com design de contato posterior que melhor administra o mecanismo fundamental de degradação da potência inerente aos dispositivos FV de CdTe. A melhoria em relação ao tempo de vida nas usinas FV para uma taxa de degradação a longo prazo proporcionada pelo novo contato posterior, permite que a orientação referente à degradação de longo prazo da First Solar possa ser melhorada para -0,5% ao ano para todos os climas [59].

3.2. Acúmulo de sujeira sobre os módulos FV (*soiling*)

Como o mercado FV desenvolve-se na escala multi-gigawatts, as maiores usinas FV estão sendo instaladas em áreas do globo onde as questões de acúmulo de sujeira (do inglês *soiling*) precisam ser levadas em conta. O *soiling* tem sido uma questão bastante estudada em muitos locais do mundo, da Arábia Saudita [60] para o sudoeste dos EUA [61,62], e na região ensolarada de Málaga, na Espanha [63] e Kuwait [64], entre muitos outros.

O acúmulo de sujeira sobre os módulos FV é uma importante questão em relação à sua potência de saída. Revestimentos anti-poeira, que visam reduzir as perdas por sujeira, são um tema muito interessante e promissor [60]. Dependendo das condições ambientais, as diferentes superfícies e revestimentos antirreflexo, que são aplicados sobre o vidro a fim de aumentar a produção anual de um módulo FV, podem se tornar ineficazes e a transmitância do vidro pode ser reduzida abaixo do nível do vidro não revestido ou não tratado. Estudos anteriores revelaram enormes perdas de eficiência devido à sujeira, até -80% dentro de um período de 6 meses [60].

No emergente mercado FV brasileiro, usinas FV também serão implantadas em locais onde a poeira será um problema. As Figuras 31 e 32 mostram alguns exemplos de locais de teste no nordeste brasileiro, onde diferentes tecnologias de módulos FV estão sendo implantadas lado a lado para investigar os efeitos da poeira sobre o desempenho do sistema FV, dentre outros efeitos relacionados à operação de sistemas FV em áreas ensolaradas e quentes no Brasil.



Figura 31: Exemplo de condições de *soiling* elevadas e uniformes em um local de teste de sistemas FV no sudeste brasileiro.

Muitos dos lugares ensolarados no Brasil, onde as usinas FV serão instaladas são, também, locais de muito vento e as usinas FV, muitas vezes, operam lado a lado com os parques eólicos, como mostrado na Figura 32. Uma vantagem dos locais com bastante vento é que os módulos FV irão operar sob temperaturas mais baixas e, conseqüentemente, sofrerão menores perdas de desempenho devido aos efeitos da temperatura. No entanto, o vento também aumenta o empoeiramento e promove a distribuição não uniforme de poeira, como mostrado na Figura 32, o que pode levar a efeitos adversos sobre o desempenho que são muitas vezes específicos do design do módulo FV, do design elétrico do sistema FV e da disposição do sistema FV.

Revisão Científica da Literatura sobre a Tecnologia Fotovoltaica de Filmes Finos de CdTe
 Avaliação dos impactos e benefícios da tecnologia solar fotovoltaica de CdTe da First Solar para aplicações de grande porte no Brasil: desempenho, impactos ambientais e à saúde e segurança



Figura 32: Exemplos de condições de empoeiramento pesadas e não uniformes em um local de teste de sistemas FV na região Sudeste do Brasil. Não uniformidades no padrão de sujeira são causadas principalmente pelas condições de vento forte.

3.3. Teste de Confiabilidade

Para que a energia solar seja capaz de competir com as tecnologias convencionais de geração de eletricidade, as usinas FV precisam entregar energia de forma confiável ao longo de 25 a 30 anos, operando em condições ambientais muitas vezes adversas. Fabricantes de módulos FV oferecem garantias de produto de até 10 anos e garantias de desempenho tipicamente de 80% da potência nominal para 25 anos de operação. A First Solar mantém um laboratório de confiabilidade ISO 17025, de primeira classe, calibrado e com equipamentos automatizados e coleta de dados e um extenso programa de treinamento pessoal. A Tabela 3 mostra alguns números sobre o extenso programa de testes de confiabilidade atualmente em vigor nas instalações da First Solar, nos EUA e na Malásia, bem como em locais de teste em todo o mundo.

Tabela 3: Dados dos testes extensivos feitos pela First Solar em módulos FV de CdTe, na planta de produção de Perrysburg-OH e globalmente.

	Perrysburg	Global
Módulos testados por ano	40.000 módulos/ano	80.800 módulo por ano
Módulos atualmente em teste	Mais de 1.300 módulos	Mais de 4.000 módulos
MW testados por ano	Mais de 3,5 MW/ano	Mais de 4.400 MW/ano
Área do Laboratório de Confiabilidade	2.676 m ²	5.974 m ²

Os recentes avanços na pesquisa e desenvolvimento no CdTe reduziram a degradação de potência a longo prazo e estenderam o desempenho do teste de confiabilidade dos módulos FV de filmes finos de CdTe da First Solar. A First Solar introduziu recentemente uma nova estrutura de célula com design melhorado no contato posterior que administra melhor o mecanismo fundamental de degradação de potência inerente aos dispositivos FV de CdTe [59]. Esta propriedade construtiva dos módulos da série *Black* da First Solar melhora significativamente a durabilidade a longo prazo. Os métodos de teste acelerados em laboratório, testes de campo e demais análises são realizadas em vários locais ao redor do mundo. Os avanços no desempenho da célula solar, juntamente com as inovações nos materiais dos módulos, fundamentam ainda mais a capacidade de geração de energia no longo prazo dos módulos FV de CdTe da First Solar em condições de operação severas [59].

O laboratório de confiabilidade da First Solar realiza atividades de suporte à evolução do alto volume de produção (monitoramento de processos), desenvolvimento de novos produtos e processos, confiabilidade do produto (qualificação e certificação de novos produtos e processos, assistência na preparação de notas técnicas e de fichas técnicas de produtos) e garantia

(previsões de desempenho e validação de desempenho em campo). Os recursos do laboratório de confiabilidade incluem instalações ambientais (56 câmaras) e instalações de imersão de luz (143 câmaras) para o teste acelerado de produtos e embalagens; cargas estáticas e dinâmicas para simular vento, neve e gelo sob diferentes temperaturas e velocidades; sobrecarga de corrente reversa (SCR), para determinar o risco de incêndio em condições de falha de corrente reversa; câmara UV, para acelerar a exposição aos raios UV, a fim de avaliar materiais e junções adesivas sensíveis à degradação UV; teste de impacto de granizo, para verificar a capacidade do módulo FV em suportar o impacto de granizo; teste de ruptura, um teste de segurança projetado para fornecer a confiança de que lesões por corte ou perfuração são minimizadas quando um módulo FV está quebrado; teste de ponto quente (do inglês *hot spot*, ou deixar uma pequena área do módulo com temperatura superior à do seu entorno), para determinar a capacidade de um módulo FV resistir a efeitos de aquecimento causados por acúmulo de sujeira ou sombreamento; teste de tensão de impulso, para verificar a capacidade do isolamento sólido do módulo FV suportar o excesso de tensões causadas por descargas elétricas; caracterização de potência de módulos FV nas Condições Padrão de Teste e em diferentes condições de temperatura e irradiância, usando um simulador solar Classe AAA; instalação de medição de resistência de isolamento seco e molhado (*HiPot wet & dry*), para avaliar o isolamento do módulo FV em condições de funcionamento molhadas e verificar se a umidade não entra nas partes ativas; medições da espessura do módulo, para caracterizar a espessura módulo FV e sua forma relativa; automatização da inspeção visual para detectar eventuais defeitos visuais no módulo FV; medições no infravermelho próximo, para detectar eventuais defeitos no módulo que são visíveis como resultado da eletroluminescência.

Além dos testes de confiabilidade do módulo descritos acima, a First Solar recentemente começou a aplicar testes de longo prazo em paralelo, como reconhecimento da necessidade de estender a duração dos testes para melhor diferenciar os módulos FV no desempenho de longo prazo em campo [59]. Por exemplo, no Teste de Thresher, os períodos de exposição do ensaio convencional IEC de estresse ambiental são multiplicados por um fator de dois a quatro, com o objetivo de identificar os módulos de confiabilidade e desempenho verdadeiramente diferenciado no longo prazo. A First Solar é a primeira fabricante de filme fino FV a ser aprovada nos longos protocolos de testes acelerados de ciclo de vida do Teste de Thresher e Teste Sequencial de Longo Prazo [65]. A First Solar é também a primeira empresa FV a obter a nova Certificação VDE de Qualidade Testada (QT, do inglês *Quality Tested*) para usinas FV (módulo e balanço do sistema) [66].

3.4. Integração com a rede

A integração de geradores solares FV de grande porte nas redes de eletricidade em todo o mundo representa ao mesmo tempo uma oportunidade e um desafio. Usinas FV que dão suporte à estabilidade e à confiabilidade da

rede estão se tornando disponíveis conforme a geração FV cresce, a ponto de fazer uma contribuição significativa para a rede. A regulação dinâmica de tensão, o gerenciamento da energia ativa, o controle das rampas de geração, o controle de frequência e a capacidade de suportar falhas de oscilação muito rápidas (*fault-ride-through*) são todos aspectos relacionados com sistemas FV amigáveis à rede que estão operacionais hoje [67].

A Figura 33 mostra um diagrama esquemático com o exemplo de um sistema de controle de usinas e de suas interfaces com outros componentes e a Figura 34 mostra um exemplo de uma usina FV de CdTe de grande porte, com 290 MWp, com controle da usina e seu impacto sobre a rede. O controlador fornece as seguintes funções de controle ao nível da usina:

- Regulação dinâmica da tensão e/ou do fator de potência da usina de energia solar no ponto de interconexão (PI);
- Redução real da potência de saída da usina solar quando requerido, de modo que não exceda um limite especificado pelo operador;
- Controles das rampas de geração para garantir que a taxa de variação da potência de saída da usina não aumente ou se reduza mais rapidamente do que um limite especificado, na medida do possível;
- Controle de frequência para reduzir a potência de saída da usina em caso de frequência muito alta, ou aumentar a potência de saída da usina (se possível), no caso de frequências muito baixas; e
- Controles de início de operação e de desligamento da usina.

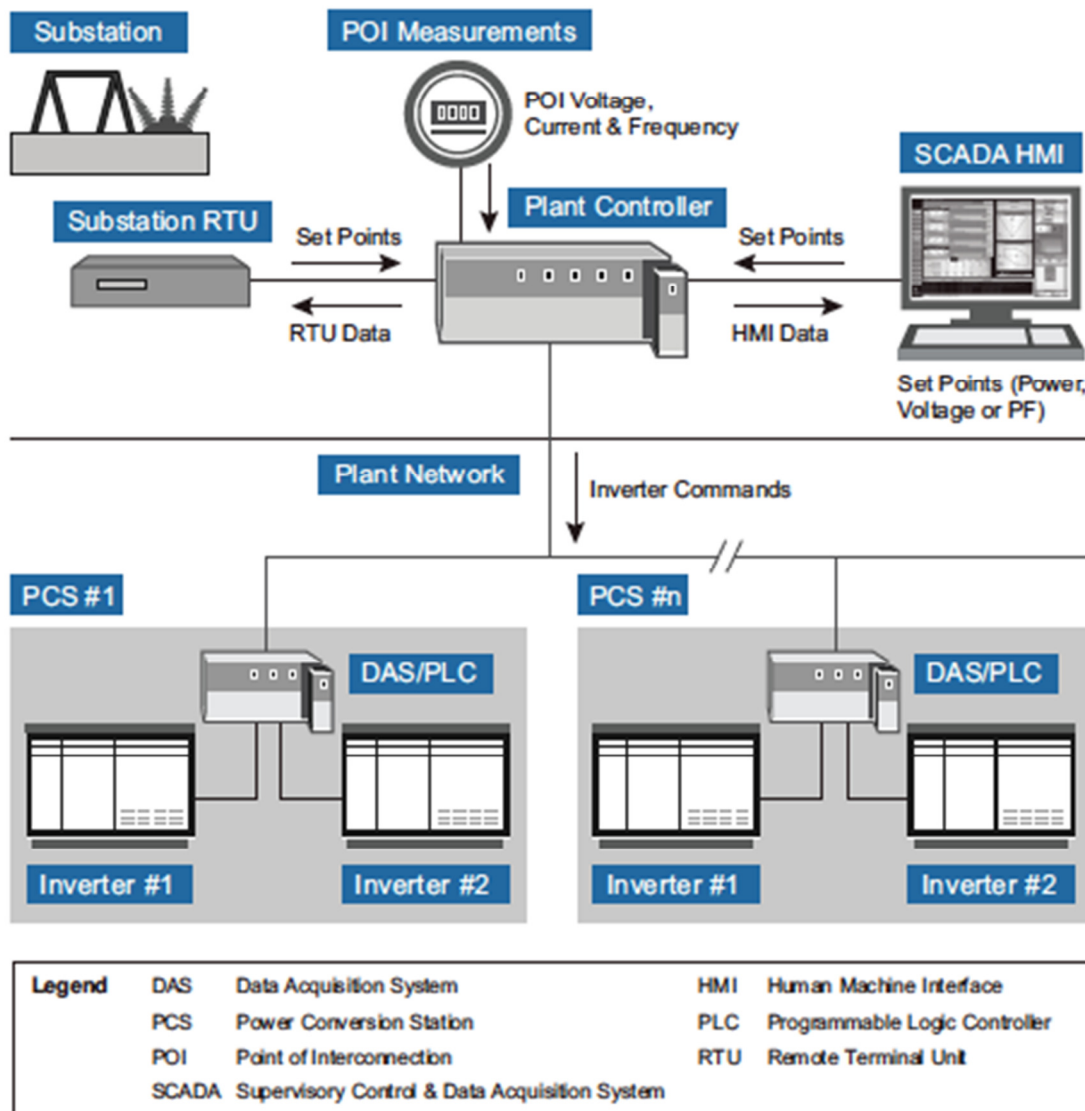


Figura 33: Exemplo de um sistema de controle da usina solar FV e de suas interfaces para outros componentes [67].

A First Solar possui e opera um Centro de Operações Solares em Tempe, Arizona, EUA (Figura 35), a partir do qual atualmente monitora o desempenho de mais de 2.000 MWp de usina FV de CdTe nos EUA.



Figura 34: Usina FV de CdTe da First Solar no condado de Yuma, no Arizona, EUA, com 290 MWp, com controle da usina de modo a oferecer suporte à rede elétrica pública [67].



Figura 35: Centro de Operações da First Solar em Tempe, Arizona, através do qual a companhia controla mais de 2.000 MWp de usinas solares FV em operação nos EUA [67].

3.5. Dados de desempenho de Campo

Usinas FV de grande porte estão crescendo rapidamente em tamanho e número, mas muito pouco é relatado publicamente sobre o desempenho específico das grandes usinas de energia solar e sobre como a sua potência de saída real medida compara-se com os valores estimados por ferramentas de modelagem que são usadas para precificar e vender seus ativos [68].

Tipicamente, uma usina de energia FV é vendida, em grande parte, com base no cálculo da produtividade (*yield*) de energia anual média de longo prazo. Uma estratégia comum para as previsões de longo prazo utiliza os dados de satélites meteorológicos e premissas de perdas estimadas, juntamente com uma ferramenta de simulação comum, como PVSyst¹⁷, para modelar o comportamento da usina ao longo de um ano “típico”. Panchula *et al.* [68] compararam o desempenho de saída medido da usina de Sarnia 20 MW_{PAC} em Ontário, no Canadá, após um ano de funcionamento contínuo, tanto para a previsão de energia a longo prazo quanto para a geração de energia esperada para o ano de 2010. Com base nos dados operacionais no primeiro ano, foi mostrado que a usina estava operando com 2,1% acima da previsão de longo prazo, o que se encontra dentro do erro esperado para as medidas.

Em um experimento de longa duração com a First Solar (antiga Solar Cells Inc.), módulos FV de filme fino de CdTe produzidos em 1995, depois de quase duas décadas de acompanhamento, o Laboratório Nacional de Energia dos EUA (National Renewable Energy Laboratory – NREL) confirmou a excelente confiabilidade da tecnologia do módulo da First Solar, sem que tenham ocorrido falhas nos módulos durante a operação do sistema [58]. A Figura 36 mostra a evolução da potência CC dos módulos de CdTe durante 17 anos (1995-2012), com uma taxa de degradação/ano de -0,53% no clima temperado do Colorado, EUA.

A taxa de energia prevista (TEP) é a relação, ao longo da vida útil do sistema, entre a produção efetiva de energia e a produção de energia prevista. A Figura 37 mostra o TEP médio, por ano de comissionamento, para 270 MW de sistemas FV instalados usando módulos FV de CdTe da First Solar (incluindo >130 MW de sistemas instalados em clima quente). O TEP fundamenta os registros de desempenho em campo da First Solar e valida a precisão da First Solar na previsão de desempenho em campo. A recomendação atual da First Solar na modelagem de sistemas FV para análise de desempenho a longo prazo é de se utilizar os seguintes índices de degradação de potência anual dos módulos FV: -0,5%/ano em climas temperados e -0,7%/ano em climas de alta temperatura [58]. Como mencionado anteriormente, a nova estrutura da célula da First Solar com design melhorado do contato posterior permite que a degradação de longo

¹⁷ <http://www.pvsyst.com/en/>

prazo da First Solar seja melhorada para -0,5% ao ano para todos os climas [59] nas novas versões do produto da First Solar.

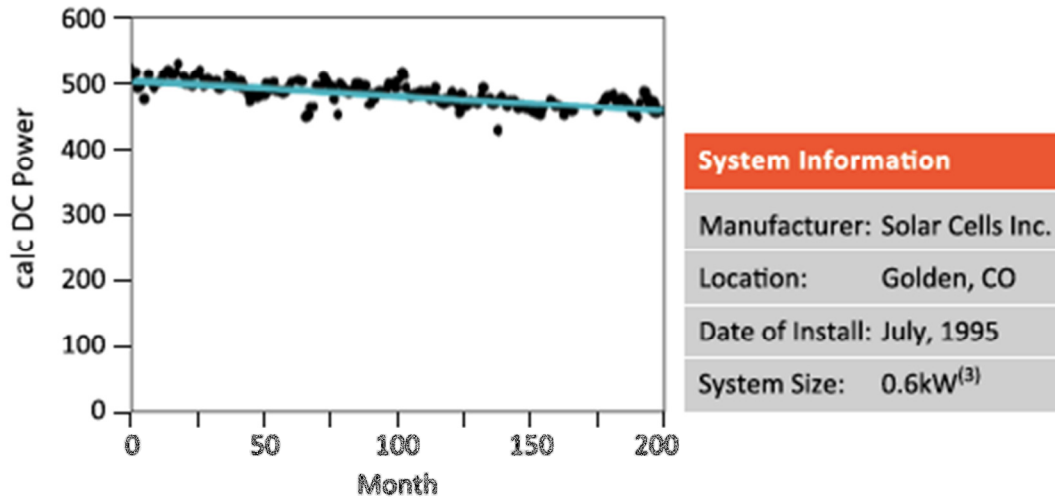


Figura 36: Avaliação do desempenho a longo prazo de módulos FV CdTe da First Solar (anteriormente Solar Cells Inc.) realizada pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável dos EUA (National Renewable Energy Laboratory – NREL), de 1995 a 2012. Taxa de degradação de potência de saída anual é de 0,53% / ano [58].

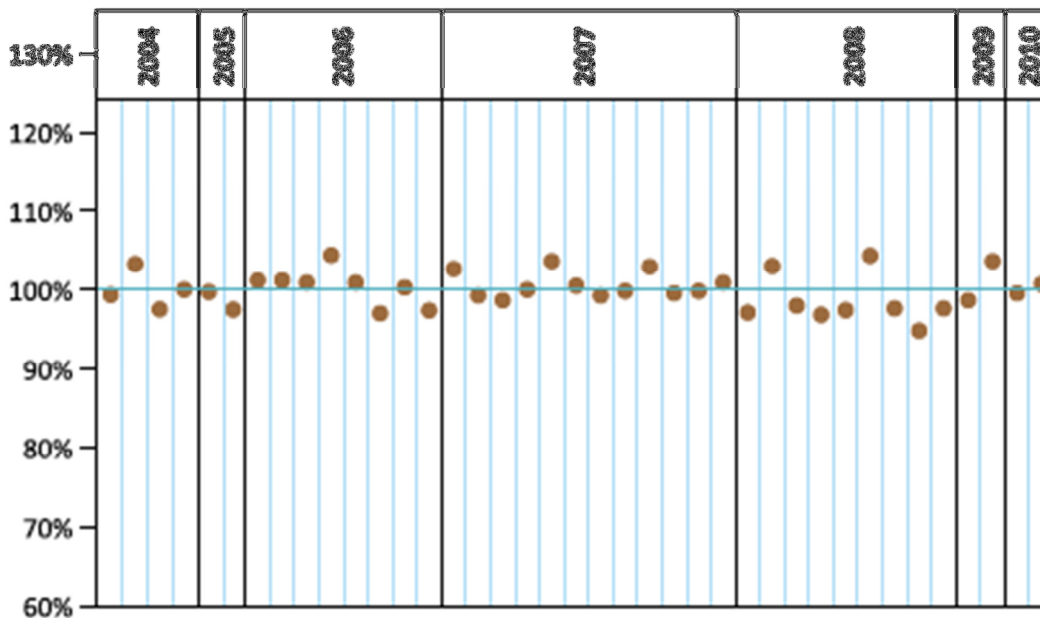


Figura 37: Razão de Energia Prevista (REP) média, por ano de comissionamento, para 270 MW de sistemas FV instalados usando módulos FV de CdTe da First Solar (incluindo >130 MW de sistemas instalados em clima quente) [58].

Referências e Leitura Posterior

A lista a seguir contém todas as referências à literatura publicada e publicamente disponíveis citadas neste relatório, incluindo os 12 relatórios de *peer review* anteriores (referências [16-27]) realizados em nome da First Solar por peritos independentes dos EUA (2003), da União Europeia (2005), da França (2009), da Espanha (2010), da Índia (2012), da Itália (2012), do Oriente Médio (2012), da Alemanha (2012), do Japão (2012), da Tailândia (2012), da China (2013) e do Chile (2013).

- [1] REN21. Renewable 2014 – Global Status Report. 2014.
<http://www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx>
- [2] <http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/default.aspx>.
- [3] Fthenakis, V., and Kim, H. C.. Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 14, pp. 2039–2048, 2010.
- [4] Sinha, P.; Meader A., and de Wild-Scholten, M.. Life Cycle Water Usage in CdTe Photovoltaics. *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 3, Number 1, pp. 429-432. 2013.
- [5] dos Santos, M. A.; Rosa, L. P.; Sikar, B.; Sikar, E., and dos Santos, E. O.. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy* 34, pp. 481–488. 2006.
- [6] Naspolini, H. F., and Rütther, R.. Assessing the technical and economic viability of low-cost domestic solar hot water systems (DSHWS) in low-income residential dwellings in Brazil. *Renewable Energy* 48, pp. 92-99. 2012.
- [7] MCTI. CO2 Emission Factors according to the methodological tool: “Tool to calculate the emission factor for an electricity system, versions 1, 1.1, 2, 2.1.0 and 2.2.0” approved by the CDM Executive Board. Accessed in 2015. <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/307492.html>
- [8] International Rivers Network. Greenhouse Gas Emissions from Dams FAQ. May 2007. <http://www.internationalrivers.org/files/attached-files/globalresghgsfaq.pdf>
- [9] Kaczmar, S.. Evaluating the Read-Across Approach on CdTe Toxicity for CdTe Photovoltaics. SETAC North America 32nd Annual Meeting, Boston, MA. November 2011.
- [10] Zayed, J., and Philippe, S.. Acute Oral and Inhalation Toxicities in Rats with Cadmium Telluride. *International Journal of Toxicology*, 28 (4): pp. 259-265. 2009.
- [11] Fthenakis, V., and Zweibel, K.. CdTe FV: real and perceived EHS risks. NREL Solar Program Review Meeting, Denver-CO. 2003.

- [12] Cunningham, D.. Discussion about TCLP protocols. Photovoltaics and the Environment Workshop, Brookhaven National Laboratory, BNL-52557. July 23-24, 1998.
- [13] Chapin, D. M.; Fuller, C. S., and Pearson, G. L.. A New Silicon pn Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. Journal of Applied Physics, Vol. 25, pp. 676-677. 1954.
- [14] Perlin, J.. From space to Earth: The story of solar electricity. Earthscan. ISBN 0-937948-14-1, p. 224. 1999.
- [15] Bonnet, D., and Meyers, P.. Cadmium-telluride - Material for thin film solar cells. J. Mater. Res., Vol. 13, No. 10, pp. 2740-2753. 1998.
- [16] First Solar Peer Review USA. 2003.
- [17] First Solar Peer Review the European Union. 2005.
- [18] First Solar Peer Review France. 2009.
- [19] First Solar Peer Review Spain. 2010.
- [20] First Solar Peer Review Japan. 2012.
- [21] First Solar Peer Review Germany. 2012.
- [22] First Solar Peer Review Italy. 2012.
- [23] First Solar Peer Review India. 2012.
- [24] First Solar Peer Review Thailand. 2012.
- [25] First Solar Peer Review the Middle East. 2012.
- [26] First Solar Peer Review China. 2013.
- [27] First Solar Peer Review Chile. 2013.
- [28] Burgelman, M.. Cadmium Telluride Thin Film Solar Cells: Characterization, Fabrication and Modeling. In J. Poortmans and V. Arkhipov, Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications, Wiley Series in Materials for Electronic & Optoelectronic Applications, John Wiley & Sons, Chapter 7, pp. 277-314. 2006.
- [29] NREL. Best Research-Cell Efficiencies. Accessed in 2015.
http://www.nrel.gov/ncFV/images/efficiency_chart.jpg
- [30] Mints, P.. Solar Flare, Issue 3. June 2014.
- [31] ISE. Photovoltaics Report. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Freiburg, 24 October 2014.
<http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/photovoltaics-report-slides.pdf>
- [32] Jenny, D. A., and Bube, R. H.. Semiconducting CdTe. Phys. Rev. 96, pp. 1190-1199. 1954.
- [33] Bonnet, D., and Rabenhorst, H.. New results on the development of a thin film p-CdTe/n-CdS heterojunction solar cell, Proceedings of the 9th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, New York, pp 129-131. 1972.

- [34] Green, M. A.; Emery, K.; Hishikawa, Y.; Warta, W., and Dunlop, E. D.. Solar cell efficiency tables (version 44). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, V. 22: pp. 701-710. 2014.
- [35] Zweibel, K.. The Impact of Tellurium Supply on Cadmium Telluride Photovoltaics. Science, V. 328: pp. 699-701. 2010.
- [36] Virtuani, A., Paganello, D., Friesen, G.. Overview of temperature coefficients of different thin-film photovoltaic technologies. Proceedings of the 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia-Spain. 2010.
- [37] Minnaert, B., and Veelaert, P.. A proposal for typical artificial light sources for the characterization of indoor photovoltaic applications. Energies. V. 7, Issue 3, pp 1500-1516. 2014. <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/3/1500>
- [38] Haag, R.. Estimativa da distribuição espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através de análise multiinstrumental. Doctoral Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.
- [39] Mints, P.. Solar Flare. Issue 1, February 2014.
- [40] Oda, O.. Compound semiconductors bulk materials and characterizations. World Scientific, ISBN 978-981-02-1728-0. 2007.
- [41] Fthenakis V. M.. Life Cycle Impact Analysis of Cadmium in CdTe Photovoltaic Production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, V. 8, pp. 303-334. 2004.
- [42] Houari, Y.; Speirs, J.; Candelise, C., and Gross. R.. A system dynamics model of tellurium availability for CdTe FV. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. V. 22, Issue 1, pp. 129-146. DOI: 10.1002/pip.2359. 2014. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2359/abstract>
- [43] Fthenakis, V. M.. Sustainability metrics for extending thin-film photovoltaics to terawatt levels. MRS BULLETIN. Vol. 37, pp. 425-430. 2012.
- [44] Bohland, J. R., and Smigielski, K.. First Solar's CdTe module manufacturing experience; environmental, health and safety results. Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 575-578. Anchorage, AK. September, 2000. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=915904>
- [45] Fthenakis, V. M.; Kim, H. C., and Alsema, E.. Emissions from Photovoltaic Life Cycles. Environmental Science and Technology, V. 42, Issue 6, pp. 2168-2174. 2008. <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es071763q>
- [46] EPRI. PISCES database for US power plants and US coal. Electric Power Research Institute. 2002.

- [47] Sinha, P.; Balas, R.; Krueger, L., and Wade, A.. Fate and Transport Evaluation of Potential Leaching Risks from Cadmium Telluride Photovoltaics. *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 31, pp. 1670-1675, 2012.
- [48] Fthenakis, V. M.; Fuhrmann, M.; Heiser, J.; Lanzirotti, A.; Fitts, J., and Wang, W.. Emissions and Encapsulation of Cadmium in CdTe FV Modules During Fires. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, pp. 713-723. 2005.
- [49] Beckmann, J., and Mennenga, A.. Calculation of emissions when there is a fire in a photovoltaic system made of cadmium telluride modules. Bavarian Environmental Agency, Augsburg, Germany, 2011.
- [50] Sinha, P.; Trumbull, V. L.; Kaczmar, S. W.; Johnson, K. A.. Evaluation of Potential Health and Environmental Impacts from End-of-life Disposal of Photovoltaics. In: Gill, M.A. (Ed.) *Photovoltaics: Synthesis, Applications and Emerging Technologies*. NOVA Publishers, pp. 37-52. 2014.
- [51] Han, J-X.; Shang, Q., and Du, Y. Review: effect of environmental cadmium pollution on human health. *Health*, Vol. 1, No. 3, pp. 159-166. 2009.
- [52] Peng *et al.* Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 19, pp. 255–274. 2013.
- [53] Fthenakis, V., and Kim, H. C.. Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 13, pp. 1465-1474. 2009.
- [54] Peschel, T.. Solar parks: opportunities for biodiversity – a report on biodiversity in and around ground-mounted photovoltaic plants. Renewable Energy Agency. 2010.
- [55] Turney, D., and Fthenakis, V.. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 15, pp. 3261-3270. 2011.
- [56] Nobre, A.; Malhotra, R.; Tang, C. H.; Reise, C.; Kiefer, K.; Rüter, R., and Reindl, T.. Degradation analysis of photovoltaic systems in a tropical environment. Proc. 38th European Union Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, pp. 1-6. 2013.
- [57] Rüter, R.. Demonstrating the superior performance of thin-film amorphous silicon for building-integrated systems in warm climates. Proceedings of the International Solar Energy Society's Solar World Congress, Israel, pp. 1-6. 1999.
- [58] Strevel, N.; Trippel, L., and Gloeckler, M.. Performance characterization and superior energy yield of First Solar FV power plants in high-temperature conditions. *Photovoltaics International*, vol. 17, pp. 148-154. 2012.

- [59] Strevel, N.; Trippel, L.; Kotarba, C., and Khan, I.. Improvements in CdTe module reliability and long-term degradation through advances in construction and device innovation. *Photovoltaics International*, vol. 22, pp. 1-8. December 2013.
http://www.firstsolar.com/~media/documents/white-papers/FVi_22_first_solar_reliability_whitepaper_lowres.ashx
- [60] Klimm, E.; Lorenz, T., and Weiss, K-A.. Can anti-soiling coating on solar glass influence the degree of performance loss over time of FV modules drastically?. *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris-France*, pp. 1-6. 2013.
<http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/konferenzbeitraege/konferenzbeitraege-2013/28th-euFVsec/klimm.pdf>
- [61] Kimber, A.; Mitchell, L.; Nogradi, S., and Wenger, H.. The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in California and the Southwest Region of the United States. *Proc. 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii-USA*, pp. 1-6. 2006.
- [62] Gostein, M.; Caron, J. R., and Littmann, B.. Measuring Soiling Losses at Utility-scale FV Power Plants. *40th IEEE FVSC, Denver, CO*. Pp. 0885-0890. 2014.
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6925056&tag=1
- [63] Cañete, C.; Moreno, R.; Carretero, J.; Piliouguine, M.; Sidrach-de-Cardona, M.; Hirose, J., and Ogawa, S.. Effect of self-cleaning coating surface in the temperature and soiling losses of photovoltaic modules. *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt-Germany*, pp. 3432-3435. 2012.
http://www.researchgate.net/publication/259811579_Effect_of_the_Self-Cleaning_Coating_Surface_in_the_Temperature_and_Soiling_Losses_of_Photovoltaic_Modules
- [64] Qasem, H.; Betts, T. R.; Müllejans, H.; AlBusairi, H., and Gottschalg, R.. Dust-induced shading on photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. V. 22, issue 2, pp. 218-226. DOI: 10.1002/pip.2230. 2014.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2230/abstract>
- [65] Sinha, P.. Life cycle materials and water management for CdTe photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol.119, pp. 271-275. 2013.
- [66] FV Magazine. VDE, Fraunhofer ISE award First Solar first quality tested certification. 22 October 2014. http://www.FV-magazine.com/news/details/beitrag/vde--fraunhofer-ise-award-first-solar-first-quality-tested-certification_100016892/#ixzz3TC5KjFmG
- [67] Morjaria, M.; Anichkov, D.. 'Grid-Friendly' Utility-Scale FV Plants. *Transmission & Distribution World*, August 14, 2013.
<http://tdworld.com/generation-renewables/grid-friendly-utility-scale-FV-plants>

- [68] Panchula, A. F.; Hayes, W., and Kimber, A.. First year performance of a 20MWac FV power plant. 37th IEEE FVSC, Seattle, WA, p. 1993. 2011.
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6186344>