



vitecfv # 5: Celdas y módulos FV: ayer, hoy, mañana

DR.C. DANIEL STOLIK

24 NOVIEMBRE 2020

La celda solar FV es el corazón de la FV

En el 1er (2011) y 2do (2012) Taller Cuba FV, con el objetivo de promover la proposición de desarrollar el desarrollo FV del país, planteábamos la diversidad de criterios mundiales sobre los pronósticos FV, donde debido al alto costo que tenía la celda FV hasta la década de los 90, existieron muchos **Detractores** de la FV, pero con la sostenida disminución de costos y aumentos de las eficiencias, fueron aceptando la tecnología FV, pasando todavía más bien a pronósticos **Pesimistas** con relación al aporte de la componente FV en el MIX de generación eléctrica. Así fue mundialmente y Cuba no fue la excepción, Por suerte, siempre hubo **"Realistas"**, **los** que en ocasiones fuimos catalogados de idealistas-fanáticos FV por parte de sobrevivientes detractores, los que por fortuna fueron desapareciendo paulatinamente, como por ejemplo la prestigiosa IEA (Agencia Internacional de Energía) que con el paso del tiempo tuvo que ir aumentando los pronósticos FV. En Cuba el periodo de convencimiento ya paso, hoy el criterio dominante es de una gran oportunidad, al tiempo que se abre una etapa más compleja, la de: "como", "cuando". "hasta donde", "con que", entre otros factores, en los que hay que tener en cuenta el espectacular desarrollo que ha tenido la tecnología de la celda solar FV y que seguirá teniendo en próximos años.

Diferencia de celdas FV de laboratorio vs. Industrial

En internet se publica una apreciable información sobre distintos tipos de celdas FV que se desarrollan a nivel de laboratorio. Realmente existe una notable diferencia entre las celdas de laboratorio y las industriales, las que se exponen junto con otros aspectos de celdas y módulos en los capítulos 6 y 7 de "Energía FV para Cuba". Las de laboratorio componen decenas de diferentes tecnologías y materiales en estadio de investigaciones, mientras que a las de producción industrial llegan concretamente un número mucho menor, cuyas diferencias se expresan sucintamente a continuación:

	LABORATORIO	INDUSTRIA
Producción	ínfima	masiva
Tiempo utilizado	No importa cuanto	Es fundamental.
Procesamientos	Manual por lotes (batch)	Continuo automatizado.
Número de pasos.	No importa cuantos	Pocos pasos
Área.	Poca	Más extensa
Material utilizado	Poco	Mucho
Veces que sale mal	No importa cuantas	Deben salir bien (alto yield).
Eficiencia	Mayor como celda	Menor como celda en módulo

También se diferencian en eficiencias, costos y obsolescencia.

La FV ayer y hoy

El efecto FV tuvo el gran salto de menos del 1 % a unos 6 % de eficiencia en la década de los 50 del siglo pasado, a raíz del descubrimiento del comportamiento de la juntura p-n en los materiales semiconductores, para entonces las celdas resultaban muy caras por lo que comenzaron a utilizarse como fuentes de energía eléctrica primeramente en satélites espaciales.

A mediados de la década de los 70 los materiales que lograban mayores eficiencias de laboratorio eran las de silicio mono cristalino, Si-mono, (13 %) y las extremadamente caras de Arseniuro e Galio, AsGa (22%). También en esa época estaban las de silicio amorfo, Si-a, con el 1 %, Las de cadmio–teluro, CdTe (9%) y las de Cobre-Indio-Selenio (CIS) un 6 %. TODAS Estas variantes han subsistido hasta hoy con los siguientes records de eficiencias de laboratorio (no industriales) de una juntura p-n :

Eficiencias en 2020

- Si mono 26.1 %
- Si-a 14 %
- CdTe 22.1 %
- CISG 23,4 % (se añadió galio)
- AsGa 27.8 %

Cuando se añaden más junturas p-n que combinan distintas variantes de elementos químicos, aumenta la eficiencia debido a mayor utilización del espectro solar (ver en "FV para Cuba", el record lo tiene la celda multi juntura de laboratorio de AsGa de 6 uniones p-n con una increíble eficiencia de 47.1 %, pero lamentablemente muy caras por lo que no compite comercialmente con otros tipos de celdas y módulos industriales

Durante los últimos 40 años se han estado experimentando otras alternativas de materiales para la obtención de celdas solares FV, de una o más juntas p-n (tándem), con o sin concentración de rayos solares, flexibles o rígidas, etc. (ver características y detalles en libro FV para Cuba). Entre las más importantes se encuentran con sus records de eficiencias de laboratorio, las de:

Poli (multi) silicio,	14 % en 1984,	hoy 23.3 %
Si-HIT, hetero junturas con Si-a	20 % en 2001,	hoy 26.7 %
Dye sensibilizadas	7 % en 1991,	hoy 12,3 %
Orgánicas	3 % en 2001,	hoy 17,5 %
Nanotecnológicas de puntos cuánticos	4% en 2010,	hoy 16.6 %
Inorgánicas (CZTSTe)	9 % en 2010,	hoy 12,6 %
Perovskita	16 % en 2013,	hoy 25.5 %
Tandem silicio mono-perovskita	24 % en 2017,	hoy 29.1 %
Tandem CIGS-perovskita	4,2 % en 2019,	hoy 24,2 %

Celdas FV industriales

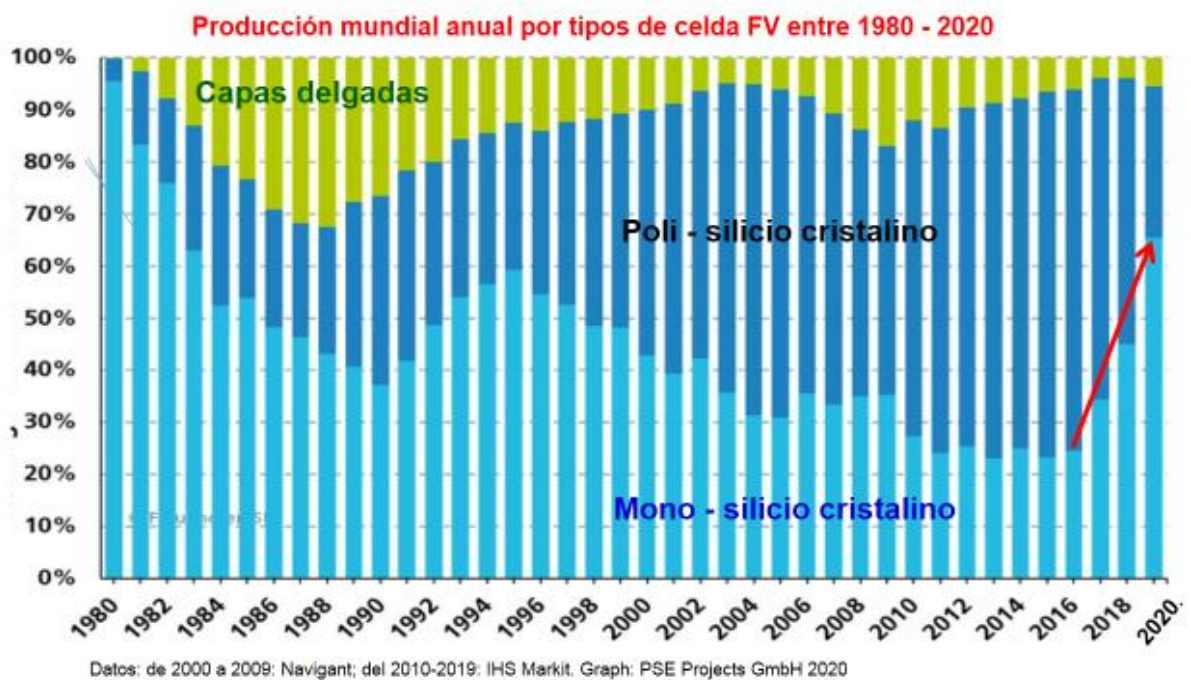
Las primeras celdas industriales eran de silicio mono cristalino, posteriormente a partir de 1990 comenzó lentamente a aumentar las producciones de multi silicio (poli-Si) y

las de capas delgadas. Por aquella primera época de desarrollo FV se buscaba afanosamente disminuir el altísimo costo de la celda solar de silicio mono cristalino, que en 1956 rondaba los 300 USD/Wp y surgieron los tipos de celdas en capas delgadas con el objetivo de hacerlas más baratas, que comenzaron a producirse, concretamente con:

- Cadmio Teluro (CdTe)
- Cobre Indio Selenio (CIS), años mas tardes se agregó el Galio.
- Silicio amorfo (Si-a)

También para abaratar la celda de silicio mono cristalino comenzó la producción de celdas y módulos de silicio multi cristalino (poli), debido a su menor costo de crecimiento de los lingotes poli cristalinos en lugar de la técnica más cara de crecer los lingotes mono cristalinos por el método Czockralski.

A continuación se expone el comportamiento por tipos de celdas industriales entre los años 1980 y 2020:



En el gráfico anterior se muestra la evolución porcentual de la producción por tipos de celdas FV, mientras que el incremento en términos de producción absoluta paso de solamente 3.3 MW instalados en 1980 a unos 120 000 MW durante 2019, en este año 2020 será algo menor debido a la pandemia, pero en 2021 continuara el incremento.

Nótese que las de capas delgadas comenzaron un rápido crecimiento porcentual hasta 1988 y las de Si-mono a decrecer paulatinamente, aunque manteniendo el liderazgo, mientras las de Si-poli crecía y hacia 1990 se igualaba al Si-mono que comenzó nuevamente a subir durante cerca de 4 años a costa de la disminución de las celdas y módulos de capas delgadas. A partir del año 2000 comenzó un sostenido crecimiento absoluto y porcentual de las celdas y módulos de poli-Si hasta 2015. A partir de 2016, como muestra la flecha roja del gráfico, comenzó nuevamente el aumento porcentual de las celdas de Si-mono, motivado en gran parte por el incremento de las instalaciones FV de autoconsumo en los distintos sectores.

La esperada sustitución de las celdas y módulos de silicio cristalino por las de capas delgadas no se produjo y, al contrario de lo esperado, las cristalinas de silicio fueron dominando el mas el mercado FV, según se muestra en la próxima tabla:

	% en 1999	% en 2009	% en 2014	% en 2019
Si mono	37,4	34,1	29,8	65,5
Si poli	42,1	46	62	28,9
Total Si cristalino	79,5	80,1	91,8	94,4

La evolución de las de capas delgadas fue la siguiente:

	% en 1999	% en 2009	% en 2014	% en 2019
Cmte.	0,5	9	3,9	4.1
CIGS	0,2	1,7	1,9	1.2
Si amorfo	12,3	6,1	1,9	0,1
Total capas delgadas	13	16,8	7,7	5,4

La gran esperanza de la celda de silicio amorfo no ocurrió

En términos de potencia la producción de módulos FV en 2019 fue:

Si mono	89 700	MW
Si poli	39 600	
CdTe	5 700	
CIGS	1 600	
Si amorfo	200	

LA CELDA FV DEJO DE SER CARA

El costo aproximado del Wp disminuyó rápida y exponencialmente, el espectacular abaratamiento en periodos de 20 años para los módulos de silicio poli a puerta de fábrica fue el siguiente:

300 USD/Wp en 1956	80 USD/Wp en 1976.
80 USD/Wp en 1977	5 USD/Wp en 1997.
5 USD/Wp en 1998	0.17 USD/Wp en 2020.

En 60 años el costo del Wp disminuyó en más de unas increíbles 1700 veces. Realmente quedan menos márgenes para grandes abaratamientos de los módulos FV.

INFLUENCIA DEL COSTO DE LA CELDA EN EL kWh FV

El costo actual aproximado del módulo FV de Si-poli en promedio es de unos 17 centavos USD/Wp, mientras que la componente de la celda FV es aproximadamente de unos 10 centavos/Wp, y alrededor de la mitad, o sea, 5 cts./Wp es del silicio de alta pureza (que en 2008 superaban los 400 USD/kg y hoy es de unos 10 USD /kg). La influencia del costo del silicio puro de la celda

es actualmente en cifras redondas de un centavo de USD/gramo, hace 20 años el Watt FV contenía unos 20 gramos de Silicio, hoy unos 4 gramos.

El costo de la celda FV y por ende del módulo ha bajado tanto que evidentemente la disminución ya no va a ser tan espectacular como lo ha sido hasta ahora, hoy lo más importante es continuar aumentando las eficiencias de celdas FV, aunque sea a un mismo costo o algo ligeramente mayor por Wp (no como los altísimos costos de la multi juntura de AsGa con su 47.1 % de eficiencia). El incremento de la eficiencia influye notablemente en la disminución de los costos del resto del sistema FV, como por ejemplo área, soportes, cableados.

El comportamiento de costos y eficiencias ha estado concentrada fundamentalmente en la competencia entre las mono-Si y la poli-Si, las primeras algo más caro pero también más eficiente por lo que la diferencia del costo por Wp no se diferencia tanto.

EFICIENCIAS DE LAS CELDAS FV INDUSTRIALES

Las eficiencias de las celdas y módulos industriales continúan paulatinamente aumentando. Las de silicio poli cristalino hoy está en alrededor del 18 % y para las mono cristalinas un 21- 22 %.

PRONOSTICOS DEL DESARROLLO FUTURO DE CELDAS FV

Actualmente, a nivel de laboratorio, las investigaciones continúan en alternativas de celdas FV como las relacionadas anteriormente en los records por tipos de celdas de laboratorio, donde destacamos las variantes de: - Perovskita, - Nano estructuradas de puntos cuánticos, - Orgánicas, - Otros materiales inorgánicos. Ver análisis de las perspectivas reales de estas variantes para su producción industrial en FV para Cuba, La competencia continua, pero las alternativas de celdas tienen la difícil misión de mejorar el nivel de los ya bajos costos y buenas eficiencias, logradas y por lograr aún más, por parte de las celdas FV de silicio cristalino. A continuación recalamos las razones del predominio del silicio:

RAZONES DEL PREDOMINIO ACTUAL DE LAS CELDAS DE SILICIO

1. El silicio es súper abundante en el planeta, el 26 % de la superficie terrestre es de silicio, no habrá guerra por este motivo.
2. La producción de silicio puro grado solar (SOG) es gigantesca, paso de 3000 toneladas en 2001 a más de 400 000 toneladas en 2019.
3. El costo del kg de silicio puro bajo de unos 470 USD/kg en 2008 a 10 USD/kg en 2020.
4. El gasto eléctrico para obtener 1 kg de silicio puro, disminuyó de más de 200 kWh a menos de 30 kWh/kg
5. El espesor de las obleas de silicio al principio eran superiores a 350 μm hoy es menoe de 160 μm

6. La cantidad de silicio por celda disminuyó de más de 11 g/Wp hace unos 10 años a menos de 5 g/Wp actualmente.
7. Muestra una mayor eficiencia industrial en producción de economía de escala por tipos de celda.
8. Diferencia menor entre las eficiencias de celdas FV industriales vs laboratorio por tipos de celda.
9. El por ciento de la producción mundial de celdas de Si-c ha crecido sosteniblemente frente al resto de otros tipos de celdas.
10. La producción mundial actual de módulos es mayor de 120 000 MWp/año y un 95 % es de celdas de Si-c.
11. Continúa aumentando la eficiencia de las celdas industriales de Si-C a un 22 % para las mono cristalina y 18 % para poli cristalinas.
12. Las celdas de silicio conforman los módulos más duraderos, que son de 25 años y están pasando a 30 años de vida útil.
13. Es alto el por ciento de recuperación y reciclaje de las componentes del Módulo de Si-C que tributa a disminuir el costo fotovoltaico.
14. La celda fotovoltaica del silicio es de gran accesibilidad industrial, es una tecnología de punta pero al mismo tiempo bastante noble.
15. Continúa su evolución tecnológica. Con nano tecnología también es factible continuar mejorando las características de las celdas.
16. Se perfecciona la producción industrial de la celda de silicio, con un altísimo nivel de automatización.
17. El watt pico ha bajado espectacularmente. El aporte del costo de la celda al costo total del SFV es menor de 1 centavo de USD/kWh
18. Las mayores inversiones en fábricas de silicio, celdas y paneles continúan siendo en la fotovoltaica del silicio.
19. Tanto en laboratorio como en industria) continua la I+D+I , conducentes a mejores características y mayores eficiencias
20. Las mayores inversiones en fábricas de silicio puro, celdas y paneles continúan siendo en la fotovoltaica del silicio.

DESARROLLO DE INNOVACIONES DE LAS CELDAS FV DE Si-C

En el anexo # 10 de "Energía FV para Cuba" se relacionan las innovaciones FV en curso donde se incluye la correspondiente a las celdas de silicio que resumimos continuación.

Mayor penetración en el corte con hilos adiamantados de obleas Si-poli

Conducente a la disminución de costos debido a pérdidas del silicio en el corte de lingotes y obleas mediante hilos adiamantados,

Aumento del número de barras colectoras (busbars).

El contacto eléctrico frontal de las celdas cristalinas de silicio se realiza mediante barras (busbars), que aumenta la colección de portadores de carga al aumentar su número pero disminuyendo su ancho para evitar mayores sombras de la radiación solar. Al mismo tiempo se plantea el incremento de las celdas sin barras frontales, al pasar ambos contactos metálicos para la parte posterior de la celda y no tener "sombra" por este motivo..

Aumento de la eficiencia de las celdas fotovoltaicas.

Las variantes de celdas en base a silicio se han impuesto, el predominio ha sido la de capa de aluminio trasera, tecnología denominada "campo eléctrico posterior" (Al-BSF- back surface field). Al pasar de los años otras posibilidades planteadas teóricamente han ido encontrando soluciones tecnológicas donde se destacan las siguientes variantes:

PERC. Celda de emisor posterior pasivado (*Passivated Emitter Rear Cell*)

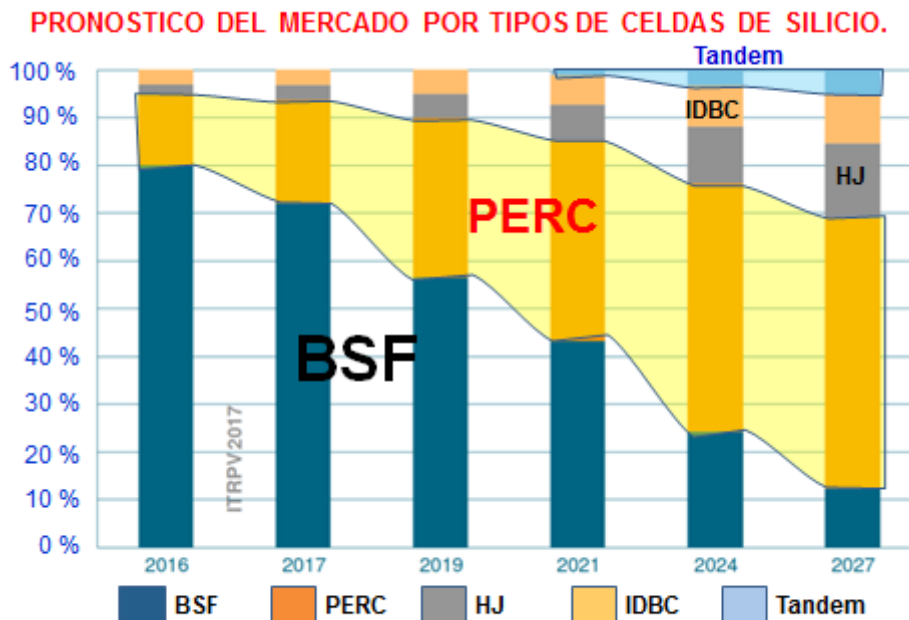
Familia de celdas proveniente de la celda PERL, de emisor pasivado y dopaje posterior (*passivated emitter, rear locally-doped*). La celda PERC aumenta su eficiencia debido fundamentalmente a la recuperación de portadores de carga (electrones) originados por la radiación solar que antes se recombinaban en la capa posterior de la celda.

HJ.(HIT). Hetero juntura. (celda de silicio monocristalino con finas capas intrínsecas, anterior y posterior, de silicio amorfo). Celdas de silicio que ostentan actualmente el record de eficiencia.

IDBC. (Inter Digitated Back-Contact cells). Tipo de celdas con todos los contactos en la capa posterior sin busbars frontales.

Si-Tandem. Celdas de multijunturas que aprovechan los logros alcanzados en celdas con sustrato de silicio monocristalino, todavía están en desarrollo a nivel de laboratorio. Se investigan distintas combinaciones, con Ge, GaAs, ultimamente con perovskita, entre otras. De resolverse los problemas tecnológicos posiblemente se introducirán a mediados del próximo decenio con posibles eficiencias entre 25 y 30 % a costos competitivos.

A continuación se muestra el pronóstico a mediano plazo del mercado de módulos FV por tipos de celdas de silicio donde se plantea el predominio de celdas PERC y el aumento paulatino de otras variantes sobre todo de las celdas tándem con soporte del propio silicio mono.



Podemos concluir que realmente la celda FV ya no es cara. El aporte del costo de la celda de silicio al total de cualquier sistema FV es actualmente menor de un centavo/kWh y hacia el 2030 debe estar por debajo de medio centavo/kWh,

Una de las tecnologías más prometedora es la combinación de la celda tándem con sustrato de celda de silicio con una finísima capa de otro semiconductor, como por ejemplo con la perovskita + Si mono, con eficiencias en celdas industriales que pueden acercarse al 30 % en menos de 10 años, siempre y cuando los costos por Wp no se incrementen o lo hagan en menos proporción que la del incremento de la eficiencia.

Nuevas alternativas de celdas serán bienvenidas, aunque el "listón" de eficiencia vs, costos establecido por la tecnología FV del silicio está bien alto.

RECOMENDACIÓN

Para Cuba al igual que mundialmente, estimamos que los módulos que por mucho tiempo se utilizarán mayormente serán los de celdas de silicio cristalino, poli algo más baratas y mono cuando haga falta priorizar instalaciones con mayores eficiencias de los paneles.

Hace unos 10 años recomendamos las instalaciones mayormente de los módulos de silicio poli cristalino, atendiendo a la relación costo-eficiencia y a la necesidad primeramente del desarrollo FV a nivel utility. Pero como referimos anteriormente a partir de 2016 comenzó el incremento de los módulos de Si-mono, aunque más caros por Watt la diferencia también se estrechó, por lo que se hace necesario en la nuevas inversiones FV analizar las variantes a acometer. En los casos que se requieran mayores potencias por área, seguramente son más recomendables las aplicaciones del silicio mono cristalino.