

## vitecfv # 35 SILICIO, CHILE, CUBA, MÍNIMO TÉCNICO Y LA FV

DR.C. DANIEL STOLIK

18 MAYO 2021

En vitecfv # 34 anterior expresamos en una nota que:

Los costos del Sog (grado solar) se han encarecido últimamente por varios motivos que analizaremos en próxima vitecfv, no obstante el incremento de los costos de los módulos FV ha sido mucho menor. Se pronostica que con el aumento sostenido de la producción de Sog continuara la disminución de los costos de los módulos FV.

A continuación los costos promedios del silicio Sog hasta mayo 2021:

Febrero 2017	Mínimo USD/kg	máximo USD/kg	Promedio USD/kg
Silicio Sog	17.50	13.50	15.7
Si. Sog de 2da.	16.50	11.80	13.24
<b>Febrero 2020</b>			
Silicio Sog	9.5	5	7.07
Si. Sog de 2da.	6.55	3.9	4.82
<b>Mayo 2021</b>			
Silicio Sog	17,5	27,9	25,88
Si. Sog de 2da.	14,5	16,5	14,69

A partir del 2008 el silicio de pureza FV no dejó de abarataarse a partir del 2008, año en que el costo superó los 400 USD por kg y disminuyó hasta unos 7 USD/kg el año pasado de 2020 (más de 50 veces en 12 años). Pero debido una serie de factores como: accidente en una línea importante de producción en China, gran aumento sostenido de la demanda de Sog (mayor que el crecimiento de la producción anual, tanto para la FV como para la microelectrónica y especificidades del mercado, el costo del silicio poli cristalino puro de 1ra., aumentó de unos 7 USD/kg en 2020 hasta cerca de 29 USD/kg a mediados de este mes de mayo 2021, con mayores ganancias para los productores de silicio.

Sin embargo el aumento que provocó en los costos de los módulos FV fue mucho menor, a costa de disminución de ganancias de los productores de módulos, como se muestra en la siguiente tabla:

Módulo poli Si	Cent USD/Wp máximo	Cent USD/Wp mínimo	Cent USD/Wp promedio
Febrero 2017	41	31	35,0
Febrero 2020	30	17	18,5
Mayo 2021	28	19	19,9

Mientras que el encarecimiento de del silicio puro creció más de un 350 % el costo de los módulos aumento en un 15%. Ambos incrementos son coyunturales y en los próximos meses debe de detenerse esta evolución con el aumento de nuevas líneas de producción. El silicio tiene muchas aplicaciones y la producción de silicio metalúrgico de mucha menos pureza es mayor de 8 millones de toneladas al año, la de silicio FV es de unos 500 000 ton y de algunas decena de miles para la micro electrónica, más bien actualmente nano electrónica, ya que los transistores equivalentes de los chips tienen 7 nm (nanómetros) industrialmente y 2 nm en desarrollo. (Increíblemente un transistor de 7 nm esta compuesto por unos 60 átomos de silicio con una densidad mas de 10 mil millones de transistores por cm<sup>2</sup> del chip, el transistor de 2 nm es solo de unos 16 átomos.

**CHILE, ESCENARIO ELÉCTRICO Y MÍNIMO TÉCNICO.**

La población de Chile es de cerca de 19 millones de habitantes, o sea, algo más de 1,5 veces la de Cuba. La potencia de generación eléctrica es de alrededor de 26 000 MW, en 2020: 59 % de FRE y 41 % de centrales térmicas: distribuido en:

FRE:		FÓSIL:	
Hidro	27 %,	Carbón	21,2 %
FV	10,8 %,	Gas	19,2 %
Eólica	8,6 %,	Petróleo (fuel, diésel)	11,4 %.
Biomasa	1,8 %		
Geotérm.	0,2 %		

Dependen energéticamente mayormente de las importaciones en 2019:

Carbón	10 550 000 000 ton.
Crudo	7 386 000 000 ton.
Diésel	5 294 000 000 ton.
Gas nat.	4 357 000 000 ton equiv.
GLP	1 400 000 000 ton equiv.
Gasolina	307 000 000 ton.
Keroseno	66 000 000 ton.

En el vitecfv anterior # 34 expusimos la información sobre la utilización en Chile, con buenos resultados, de los mínimos técnicos de las plantas termoeléctricas para aumentar la penetración FV. La COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA de Chile promueve la alternativa como aporte para tender al 70 % de FRE para 2030. A continuación los titulares de los artículos contenidos en un ANEXO TÉCNICO sobre:

#### DETERMINACIÓN DE MÍNIMOS TÉCNICOS EN UNIDADES GENERADORAS.

##### TÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

Artículo 1 Objetivo. Artículo 2 Alcance. Artículo 3 Información del Mínimo Técnico. Artículo 4 Definiciones. Artículo 5 Aplicación del Mínimo Técnico.

##### TÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÍNIMO TÉCNICO

Artículo 6 Comprobación del Mínimo Técnico. Artículo 7 Condiciones de Información y Actualización de Mínimo Técnico. Artículo 8 Consideraciones en la determinación del Mínimo Técnico. Artículo 9 Informe Técnico. Artículo 10 Observaciones al Informe de Mínimo Técnico. Artículo 11 Aceptación del Mínimo Técnico. Artículo 12 Vigencia del Mínimo Técnico

##### TÍTULO III. VERIFICACIÓN DEL MÍNIMO TÉCNICO

Artículo 13 Solicitudes de Verificación. Artículo 14 Experto Técnico para las Pruebas de Mínimo Técnico. Artículo 15 Participantes de las Pruebas. Artículo 16 Responsabilidades de los Participantes de la Prueba Artículo 17 Entrega de Información. Artículo 18 Programa de Verificación. Artículo 19 Protocolo de Pruebas. Artículo 20 Consideraciones Generales del Protocolo Pruebas. Artículo 21 Costos de la Pruebas.

##### TÍTULO IV. REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS Y VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

Artículo 22 Períodos de Medición de la Prueba de Mínimo Técnico. Artículo 23 Resultado de la Prueba de Mínimo Técnico. Artículo 24 Acta de la Prueba. Artículo 25 Entrega de Resultados de la Prueba de Mínimo Técnico. Artículo 26 Observaciones al Acta de Prueba e Informe Técnico. Artículo 27 Respuestas a las Observaciones. Artículo 28 Establecimiento del Mínimo Técnico.  
(Hasta aquí el ANEXO TÉCNICO)

#### LA FV EN CHILE Y LAS TRANSICIONES.

En vitecfv anteriores hemos analizado mejores prácticas FV en muchos países y sugerimos tener en cuenta algunas para la estrategia FV de Cuba, pero también desechar otras, todo ello de acuerdo con las características nuestras, así tomando un poco de las oportunidades de cada quien se enriquecen los elementos a tener en cuenta para conformar una mejor estrategia para Cuba.

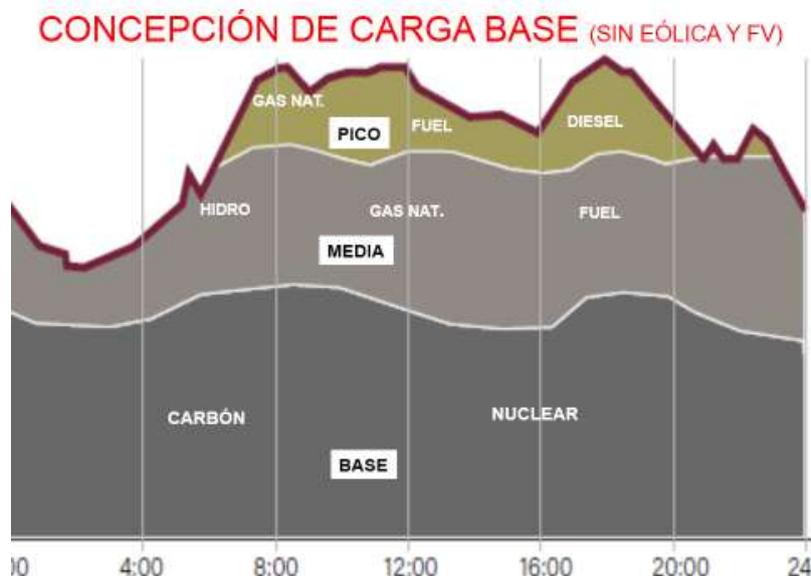
La experiencia de Chile valida en gran parte el planteamiento de utilizar en Cuba las plantas de crudo en función de aumentar el aporte de la FV y la Eólica al MIX de generación eléctrica. Chile es el país de toda Latinoamérica con la mayor penetración FV consistente en un 9% actualmente. Terminaron el 2020 con unos

3 100 MW acumulados instalados, informan que tienen otros 3 500 en construcción. La meta que plantean a largo plazo es la ambiciosa cifra de 20 000 MW FV.

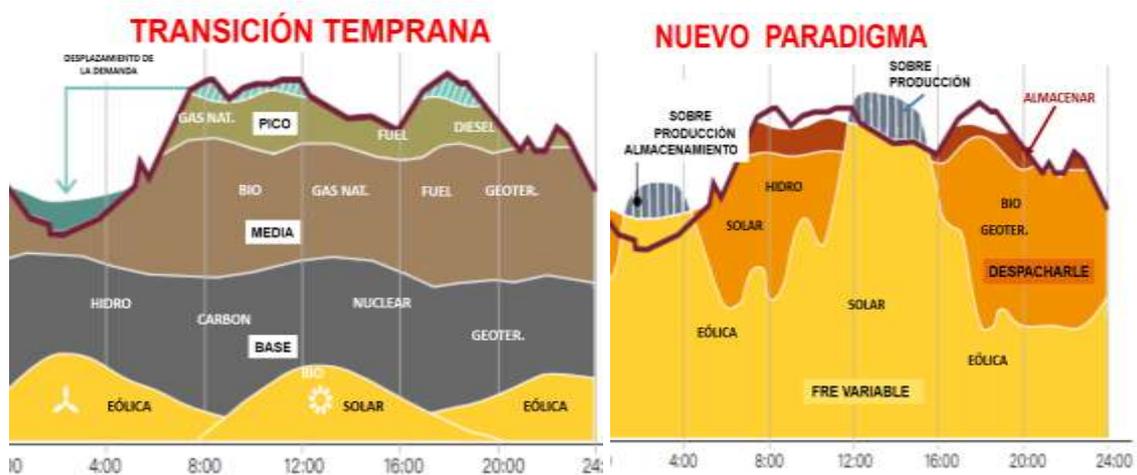
En abril del año 2016 publicamos las Señales FV # 12 y # 17, sobre múltiples medidas para aumentar la penetración-integración FV en la estrategia paulatina de transición hacia el 100 % de FRE. Recalcábamos que diferentes medidas se incorporaban con el transcurso del tiempo para ir asegurando la transición esperada. Las exigencias técnicas cambian en función del tiempo como se ejemplifica en la siguiente tabla (publicada en la Señal # 17 hace 5 años)

PENETRACIÓN	EXIGENCIAS TÉCNICAS
<b>MUY BAJO</b> < 3%	DESCONEXIÓN AUTOMÁTICA EN SITUACIONES ANÓMALAS: FRECUENCIA O TENSIÓN FUERA DE MÁRGENES. <b>LA RED TRATA A LAS INSTALACIONES FV CON UN POCO DE DESPRECIO: "COMO ERES PEQUEÑITO, SI TENGO PROBLEMAS, VETE PARA NO MOLESTAR"</b>
<b>BAJO</b> 3 a 5 %	COLABORAR A RESOLVER ALGUNAS ANOMALÍAS: MANTENERSE CONECTADO E INCLUSO PROPORCIONAR POTENCIA REACTIVA EN CASO DE HUECOS DE TENSIÓN. REGULAR POTENCIA ACTIVA, EN CASO DE QUE LA FRECUENCIA SUPERE EL UMBRAL SUPERIOR DE LA LLAMADA BANDA MUERTA. <b>LA RED VA AUMENTANDO SU CONSIDERACIÓN: "PUESTO QUE ESTÁS AHÍ, AUNQUE NO ERES MUY GRANDE, ESFUÉRTATE EN ECHAR UNA MANO CUANDO LAS COSAS VAN MAL"</b>
<b>MEDIO</b> 5 A 20%	COLABORAR A LA CALIDAD DEL SERVICIO ORDINARIO:REGULACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN EN ALGUNOS PUNTOS RELEVANTES. LIMITAR LAS RAMPAS DE VARIACIÓN DE POTENCIA. <b>LA RED DICE: "PUESTO QUE ESTÁS AHÍ Y ERES TANTO COMO CUALQUIER OTRO, COLABORA A LA BUENA MARCHA EN GENERAL DEL ASUNTO"</b>
<b>ALTO</b> > 20 %	MANTENER LA ESTABILIDAD Y ECONOMÍA DEL SISTEMA: REFORZAR LÍNEAS DE TRANSMISIÓN. AÑADIR ACUMULACIÓN. <b>LA RED DICE: PUESTO QUE YA ERES GRANDE Y QUIERES SERLO MÁS, APECHUGA* CON LAS CON.SECUENCIAS"</b> <i>*apechugar = meterle el pecho</i>

La transición es un proceso paulatino y los años de duración dependen de la política que se establezca al respecto, incluyendo los relacionados con los financiamientos. Un aspecto importante radica en la posibilidad de cambiar el paradigma establecido para la generación de electricidad que se muestra en la siguiente figura



Eso es posible gracias a que los costos del kWh FV y de la Eólica ya se tornaron más baratos que la de los combustibles fósiles. Un cambio posible paulatino puede ejemplificarse con los siguientes esquemas del mencionado paradigma (fuente REN21 y libro de Energía FV para Cuba.



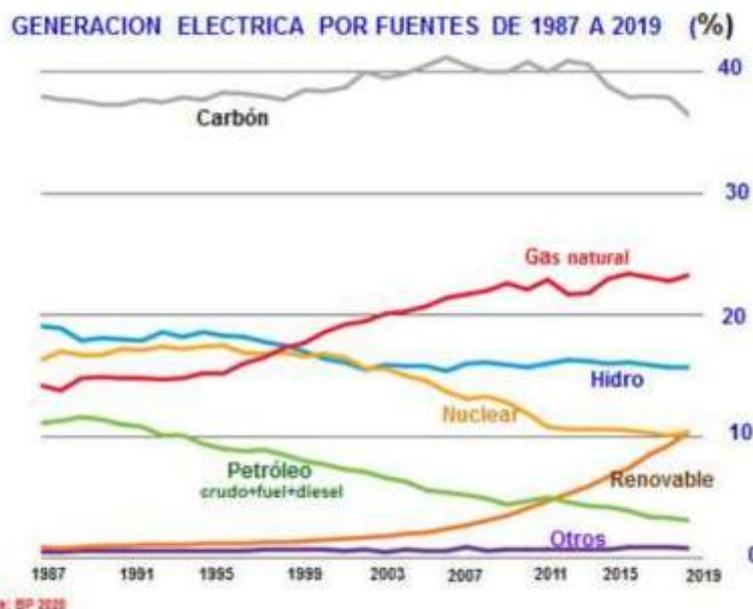
En la transición temprana la FV y la Eólica se incorporan en lo que era carga base, que pierde la característica de poder generar durante 24 horas del día y comienza a sustituir la carga base anterior a determinadas horas, las soluciones en este período son disímiles, dependen de los propios desarrollos alcanzados en FV y Eólica, de los niveles de penetración y de los costos de las distintas variantes. Al principio es lógico utilizar la flexibilidad de las plantas termoeléctricas existentes, invertir lo menos posible en nuevas plantas termoeléctricas.

En el caso de Cuba se da una situación sui generis, que es la utilización en carga base y dependencia del petróleo crudo cubano a diferencia de la mayoría de los países del mundo. Por un lado ayuda a tener un combustible propio para la generación de electricidad, pero por otro lado, como hemos planteado en ocasiones anteriores, puede disminuir la carga en horas de viento y/o sol y propiciar el aumento de la FV y la Eólica, así como aumentar la generación y asumir la carga en horas pico, sobre todo la vespertina nocturna en ausencia de los rayos solares. Con el transcurso del tiempo, dichas plantas termoeléctricas que aportaron soluciones a la variabilidad de la FV y la Eólica, se van volviendo obsoletas, pero a la vez, va aumentando el aporte de la FRE, además de la posibilidad de utilizar FRE de 24 horas como las bioenergías, la hidro, (en Cuba no tenemos nuclear ni geotérmica y la marina no acaba de ser rentable).

Otro gran recurso es el almacenamiento eléctrico, existen distintas las alternativas al respecto, la que más se ha desarrollado es la de las baterías eléctricas, que continúan abaratándose y de aumentar sus prestaciones, tanto las móviles para el transporte eléctrico como las estacionarias para almacenar y utilizarlas en forma diferida.

### LAS NUEVAS INSTALACIONES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

En vitecfv # 2 mostramos el siguiente comportamiento mundial de la generación eléctrica en % por fuentes entre 1987 y 2019:



LOS % POR FUENTES ENTRE 2010 Y 2020 SON LOS SIGUIENTES:

%	2010	2012	2014	2016	2018	2019	2020
carbón	40	40	41	39	38	37	35
gas	22	22	21	24	23	23	23
FRE	20	21	22	24	25	27	29
Nuclear	13	11	11	11	10	10	10

Nótese que las FRE:

- Aumentan en el periodo su diferencia en % con la nuclear.
- Comienzan a superar ligeramente al gas en 2014.
- Es el 32.5 % del carbón en 2010 y aumenta hasta el 83 % en 2020.

En términos de TWh, la generación eléctrica por fuentes ente 2018 y 2019 fue la siguiente (FRE sin hidro, que esta aparte):

TWh	petróleo	Gas nat.	carbón	nuclear	hidro	renov.*	otros	total
2018	890.4	6 082.5	10 091.3	2 700.4	4 171.4	2 468.0	248.9	26 652.7
2019	825.3	6 297.9	9 824.1	2 796.0	4 222.2	2 805.5	233.6	27 004.7

Los aumentos están en azul y las disminuciones en rojo

Difer.	- 65.1	+ 215.4	- 267.2	+ 95.6	+ 47,8	+ 337.5	-15.3	+ 352.0
--------	--------	---------	---------	--------	--------	---------	-------	---------

### INCREMENTOS MUNDIALES DE LA FV

El aumento de la FV acumulado en MW entre 1975 y 2020 fue el siguiente:

año	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
MW	1	3,3	19	46	192	1 250	5 112	40 130	233 000	750 000

No ha dejado de crecer, se ha multiplicado por quinquenios de la siguiente forma:

veces	X	3,3	5,7	2,4	4,2	6,5	4,1	7.8	5,8	3,2
-------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Nótese que:

- El incremento de FV instalada en 45 años fue de 750 000 veces.
- El aumento menor fue de 2,4 veces entre 1985 y 1990, (más del doble).
- El mayor de 7,8 veces entre 2005 y 2010. /cerca de 8 veces)
- El incremento promedio fue aproximadamente de 4,5 veces por quinquenio.

### PRONÓSTICOS MUNDIALES FV 2050

El reto mayor del incremento de las FRE es cumplir con el compromiso de NET ZERO emisiones de gases de efecto invernadero, cuyo significado es cuando la velocidad de generación de estos gases es igual a la eliminación natural de los mismos en la atmósfera terrestre, o sea, lo que se lleva a cero es el balance para mantener constante la cantidad necesaria de los gases de efecto invernadero, la que sin su presencia, la temperatura promedio en la superficie del planeta sería extremadamente fría para la posible existencia de vida.

Los pronósticos del aporte FV entre las FRE hacia el 2050 son variados, actualmente con unos 750 000 MW en todo el mundo, la penetración FV en el MIX mundial es aproximadamente de un 4 %. Suponiendo que la generación mundial de electricidad sea de 40 000 TWh/año en 2050, un cálculo muy aproximado de la relación entre la penetración FV, la potencia FV de instalaciones acumuladas FV y el promedio de instalaciones necesarias anuales FV durante 30 años hasta 2051, sería en cifras redondeadas la siguiente:

% de penetración FV	MW FV instalados	instalación FV anual
15 %	4,5 millones	450 GW
20 %	6	600
25 %	7,5	750
30 %	9	900

Posiblemente en el año próximo 2022 por primera vez se superen los 200 GW de instalación anual FV, aunque la velocidad de incrementos promedios necesarios sea más pequeña que la que ha tenido la FV hasta hoy, los aumentos son un verdadero reto para lograr mayores aportes FV promedios mundiales, por supuesto que habrán países con mucha FV y otros con poca, en dependencia de los potenciales por FRE. En Cuba, de acuerdo con sus características, el aporte FV debe estar muy por encima del promedio mundial.

Es necesario diferenciar el papel de las distintas fuentes renovables y no renovables en las etapas de transición con la llegada a la meta del 100 % renovable. Durante la transición la evolución de muchas fuentes de generación eléctrica son temporales, mientras que otras se van convirtiendo en definitivas, las combinaciones variantes y alternativas son muchas, por lo que se hace necesario hacer un análisis integral para lograr una buena ruta crítica de la estrategia cubana. En el camino de la transición hacia el 100 % de FRE se muestran países que dependen en momentos determinados que pueden ir cambiando más durante la transición, unos en bases a la hidroeléctrica, otras de la flexibilidad de las propias termoeléctricas, a partir de algunos momentos del desarrollo del almacenamiento de la energía eléctrica, etc. Por ejemplo tenemos países como el caso particular de Islandia que con hidro + geotérmica, prácticamente logran caso el 100 % de FRE, algunos tienen mucho potencial eólico y menos en otras, otros cuentan más con la FV, además de bioenergías y geotérmicas. Cuba está entre los países que su primer potencial renovable está en la FV, seguida en segundo lugar por la eólica y las bioenergías.

El análisis para lograr una adecuada estrategia FV continuara en próximas vitecfv.

Dr.C Daniel Stolik

[stolik@imre.uh.cu](mailto:stolik@imre.uh.cu)

[danielstoliknov@gmail.com](mailto:danielstoliknov@gmail.com)