



**Comisión de Regulación  
de Energía y Gas**

**AJUSTES A LA METODOLOGÍA  
DE CÁLCULO DE ENFICC DE  
PLANTAS SOLARES FOTOVOLTAICAS**

**DOCUMENTO CREG-701 007  
01 DE JUNIO DE 2022**

## Contenido

1.	ANTECEDENTES E INFORMACIÓN GENERAL .....	3
2.	ARBOL DE CAUSAS Y PROBLEMAS .....	6
2.1	Necesidades de revisión .....	6
2.2	Problemáticas identificadas.....	7
3.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	7
4.	OBJETIVO.....	8
5.	ALTERNATIVAS DE MODIFICACIÓN E IMPACTOS .....	8
5.1	Lineamientos mínimos del modelamiento energético.....	8
5.2	Cálculo de la ENFICC y verificación de la energía firme del CND .....	9
5.3	Tratamiento de datos previos .....	10
5.4	Metodología para plantas sin información en sitio .....	10
5.5	Validación de información de datos en sitio (cálculo con datos en sitio) .	12
5.6	Factor de Correlación de Pearson (cálculo con datos en sitio) .....	12
5.7	Valor de IHF .....	13
5.8	Ventanas de tiempo de cálculo .....	13
5.9	Suministro de Información por etapas.....	15
5.10	Actualización del modelamiento energético .....	17
5.11	Dictamen técnico, verificación de ENFICC y auditoría de parámetros declarados.....	17
5.12	Aplicación de la nueva metodología.....	18
5.13	Plazo de implementación del C.N.O.....	18
6.	PROPUESTA .....	18
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	19

## AJUSTES A LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE ENFICC PLANTAS SOLARES

### 1. ANTECEDENTES E INFORMACIÓN GENERAL

La metodología de cálculo de la Energía Firme del Cargo por Confiabilidad (ENFICC) de plantas solares fotovoltaicas se definió en la Resolución CREG 201 de 2017.

Como antecedente principal a dicha resolución, se tiene una consultoría especializada realizada por la firma FONROCHE con el objeto de que diseñará la metodología de cálculo de ENFICC de plantas solares fotovoltaicas. Metodología que se publicó a comentarios a través del documento anexo de la Circular CREG 083 de 2015.

A continuación, se resumen los principales aspectos de la metodología de que trata la Resolución CREG 201 de 2017.

#### (1) Ecuación de cálculo (basada en estudio FONROCHE)

En primer lugar, para la aplicación de la metodología se debe contar con mínimo diez años de datos, de los cuales un año deben ser medidos en el sitio de la planta y el resto de años extrapolados con un método que debe ser definido mediante Acuerdo C.N.O.

La resolución temporal del registro histórico exigido en esta metodología es de nivel horario, y se requieren las siguientes variables: irradiación global horizontal y temperatura ambiente. La metodología no tiene una opción de cálculo sin datos en sitio.

Así las cosas, para el cálculo de la ENFICC, la ecuación que aplica es la siguiente:

$$EN_{m,t} [kWh/mes] = \frac{1}{I_{STC}} \times K_c \times K_{inc} \times V_{m,t}(TA_{m,t}) \times GHI_{m,t} \times (1 - IHF) \times CEN \times Fcu$$

Donde:

$EN_{m,t}$	Energía generada en el mes $m$ del año $t$ , en kWh/mes
$I_{STC}$	Irradiancia en condiciones constantes. $I_{STC}=1kW/m^2$
$K_c$	Constante por pérdidas de un sistema solar fotovoltaico. $K_c = 0,9139$
$K_{inc}$	Constante de inclinación a elegir de acuerdo con el tipo de tecnología de estructura de soporte.
$V_{m,t}(TA_{m,t})$	Valor por pérdidas debidas a temperatura ambiente según el tipo de modulo fotovoltaico utilizado para el mes $m$ del año $t$ .
$TA_{m,t}$	Promedio de temperatura ambiente para cada mes $m$ del año $t$ , en °C
$GHI_{m,t}$	Irradiación global horizontal agregada en el mes $m$ del año $t$ . [kWh-mes/m <sup>2</sup> ].

<i>IHF</i>	Indisponibilidad Histórica Forzada. Para el IHF con información reciente, se utiliza la tabla de factores definidos en el numeral 3.4.1 del anexo 3 de la Resolución CREG 071 de 2006 para plantas Solares Fotovoltaicas.
<i>CEN</i>	Capacidad efectiva neta de la Planta Solar Fotovoltaica [MW].
<i>Fcu</i>	Factor de conversión de unidades de MW a kW para la CEN. $F_{cu}=1000$ .

El cálculo de la ENFICC consiste en encontrar el valor de  $EN_{m,t}$  para cada mes de todos los datos históricos de 10 o más años de datos que se tengan. Seguidamente cada valor de  $EN$  es dividido por el número de días de cada mes para obtener su representación o valor en equivalente diario en unidades de kWh/día. Finalmente el valor de la ENFICC corresponde al mínimo valor encontrado para todos los meses de toda la serie de datos del cálculo anterior.

## **(2) Modelo de calculo**

Para el cálculo del proceso anterior, la CREG estableció y publicó una Macro de Excel que permitiera realizar el cálculo de forma práctica y sin complejidad. Esto tanto para el uso del agente como para la verificación que realiza el CND de forma posterior.

## **(3) Cambios en los valores de las constantes de la formula**

Por otro lado y refiriéndonos a los valores de las constantes  $K_{inc}$  y  $V_{m,t}(TA_{m,t})$  de la formula citada, los mismos dependen del tipo de estructura y el material constructivo de los paneles (Silicio o Capa Fina) y están fijos en la resolución. Además,  $K_c$  también esta fijo, pero no depende de alguna configuración en especial.

No obstante, se previó en las reglas que el C.N.O. debía actualizar las citadas constantes una vez una planta entrara en operación. Sin embargo, esto no ha sido aplicado en la actualidad.

## **(4) Protocolos para las series de datos**

Para la serie histórica de irradiación solar horizontal y temperatura ambiente, el C.N.O., diseñó un protocolo para su verificación y medición; esto mediante el Acuerdo 1042. En general el Acuerdo contiene:

- Para la medición: Selección de instrumentos de medición, selección zona instalación, instalación, calibración y verificación.
- Metodología de ajuste y corrección para estimación de series de largo plazo (1 año de datos en sitio para reconstruir 10 años).

Se usa Método MCP y el factor de correlación de Pearson entre las series en sitio y la fuente secundaria debe ser mayor o igual a 0,9 para irradiación (GHI) y mayor o igual a 0,84 para temperatura (TA).

Similar a los protocolos que aplican a plantas eólicas, el C.N.O. establece que en un año no deben faltar más de un 5% de datos.

- Incluye proceso de verificación de series de temperatura ambiente (TA) e irradiación global horizontal (GHI).

## **(5) Otras disposiciones**

- a. En cuanto a los mecanismos de verificación de parámetros se tiene lo siguiente:
  - Para los parámetros CEN y IHF: mismo procedimiento usado para plantas hidráulica, pero con los protocolos que indique el C.N.O.
  - En la declaración de ENFICC existe un auditor que verifica el cumplimiento del Acuerdo del C.N.O. para las mediciones en sitio y la extrapolación de las series a 10 años. Este también verifica el cumplimiento de las constantes Kinc y de la ecuación correspondiente a las pérdidas por temperatura ambiente.

La auditoría debe entregar un informe y las pruebas y normas que se siguieron (normas nacionales o internacionales). Antes de la entrega del informe se puede discutir el resultado de este con el agente.

- El valor de Indisponibilidad Histórica Forzada (IHF) se estableció con base en fuentes de literatura académica internacional: (K. Hunt, 2015), (H. S. Huang, 2011), (T. Oozeki, 2010.) y (Nasse, 2003), así:

Año 1: 0,1

Año 2: mínimo entre {0,06 y el índice histórico},

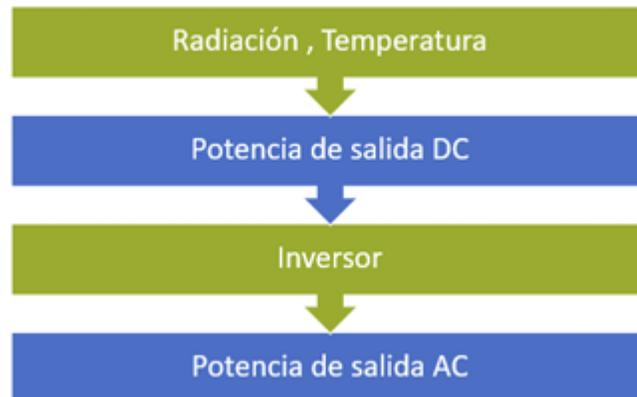
Año 3 en adelante se usa el índice histórico.

Ahora bien, dado su carácter de metodología inicial y la evolución tecnológica en la generación con este tipo de plantas, estaba previsto que la Comisión hiciese una revisión de la misma transcurrido un tiempo de su aplicación. Así mismo, durante el período de aplicación de la citada norma, se han allegado a la Comisión diversas propuestas por parte de agentes y terceros interesados para realizar ajustes a la metodología.

Adicionalmente, en el año 2020 la Comisión contrató un estudio de consultoría, con el objeto de evaluar la metodología de la Resolución CREG 201 de 2017, incluyendo los Acuerdos técnicos expedidos por el Consejo Nacional de Operación (C.N.O.) para su aplicación, el cual recomendó algunos cambios para mejorar cálculo de la energía firme de las plantas solares. El informe del estudio de consultoría se publicó en la Circular CREG 103 de 2020, y sus recomendaciones principales se pueden resumir así:

- Se recomienda uniformizar este cálculo al de las centrales eólicas, usando funciones de conversión, las que permitirán incorporar los avances tecnológicos.

- Respecto a la función de conversión, y dado que los avances tecnológicos no sólo se dan en el campo de los paneles solares propiamente, sino que también en la función inversora de Corriente Continua a Corriente Alterna, se propone una función de conversión diferenciada, de acuerdo con la figura a continuación:



- En relación con la ventana temporal, los análisis efectuados por el consultor muestran que la ventana mensual usada actualmente es la más adecuada para este tipo de centrales.

## 2. ARBOL DE CAUSAS Y PROBLEMAS

A partir de los comentarios recibidos de agentes y terceros, la evaluación del estudio de consultoría del año 2020 arriba citado, y los análisis al interior de la Comisión, se identificaron los siguientes aspectos de revisión y mejora de la metodología actual:

### 2.1 Necesidades de revisión

- a. En general, para la metodología de ENFICC de plantas solares ya se preveía una revisión integral después de los primeros años de aplicación. Se tienen aspectos previamente identificados a través de comentarios recibidos y el estudio de consultoría contratado.
- b. La fórmula utilizada para el caso de cálculo se basa en una expresión fija la cual no es flexible o no se ajusta a las características de cada planta de forma individual.
- c. El CND debe contar con una herramienta de evaluación y verificación de ENFICC. Para tal fin, se estableció un modelo en Macro de Excel que tuviera un proceso práctico para su verificación.
- d. Agentes han solicitado un análisis de complementariedad del recurso.

- e. Agentes han solicitado que se tenga otra alternativa de cálculo sin depender de datos en sitio.

## **2.2 Problemáticas identificadas**

- a. La fórmula fija utilizada no representa las características específicas de cada planta solar fotovoltaica en el SIN que puede participar en el cargo por confiabilidad, introduciendo un nivel de incertidumbre sobre la energía calculada.
- b. No existe un mecanismo de modelamiento energético con el cual se puedan identificar y reconocer las particularidades constructivas de cada planta.
- c. No existe claridad sobre la forma de actualizar las constantes que aparecen como fijas en la fórmula de la metodología, esto luego de que la planta entre en operación.
- d. Respecto a la fórmula de cálculo de la metodología actual, se ha señalado por parte de agentes y el C.N.O. que no debería incluirse la capacidad efectiva neta en la misma, pues podría sobrevalorar las pérdidas.
- e. No existe claridad en el uso del factor de degradación con los años.
- f. El lineamiento de no considerar las horas donde no hay irradiación para el cálculo de la energía debe revisarse, esto para que este en línea con otras propuestas de la Comisión.
- g. No existe un tratamiento de datos atípicos en el Acuerdo del C.N.O., esto para ser filtrados antes de obtener resultados con la aplicación de la metodología y obtener un mejor resultado en el cálculo de la energía.
- h. En comunicaciones allegadas a la Comisión, se ha sugerido la posibilidad de analizar las variaciones temporales del recurso fotovoltaico entre distintas ventanas de tiempo para estudiar objetivamente si se mantiene la ventana de cálculo actual (mensual) o si es necesario realizar ajustes.
- i. No existe un mecanismo regulatorio de autoajuste de la metodología de cálculo en el tiempo, esto para incluir cambios tecnológicos o de la experiencia de su aplicación.

## **3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La metodología de cálculo actual de ENFICC no permite tener un cálculo representativo de valoración de energía firme de plantas solares fotovoltaicas que refleje más cercanamente las condiciones y características constructivas propias y de uso del recurso energético.

#### **4. OBJETIVO**

El objetivo de la medida regulatoria es definir los cambios y ajustes en la metodología actual de cálculo de ENFICC de plantas solares fotovoltaicas, para garantizar una mejor evaluación de la energía firme obtenible de este tipo de recursos, para su uso en el mecanismo del Cargo por Confiabilidad.

#### **5. ALTERNATIVAS DE MODIFICACIÓN E IMPACTOS**

A partir del análisis de las problemáticas identificadas con la metodología actual y de sus causas, se ha identificado como principal alternativa regulatoria la de migrar a una metodología similar al de las plantas eólicas, es decir, con base en el modelamiento energético de los parques solares, estableciendo unos lineamientos y requisitos mínimos que recogen las experiencias positivas obtenidas con la aplicación de este tipo de metodología para plantas eólicas y los beneficios esperados de los ajustes propuestos este año a la misma.

Esta alternativa ofrece mayores beneficios en términos de un mejor cálculo de la energía firme de este tipo de plantas y de una mejor valoración de su aporte a la confiabilidad dentro del mecanismo del cargo por confiabilidad, frente a la opción de mantener, hacer ajustes incrementales a la fórmula de cálculo que se utiliza actualmente o de establecer varias fórmulas.

A continuación se presentan y explican los lineamientos y requisitos propuestos para la utilización de una metodología de modelamiento energético para el cálculo de la ENFICC de planta solares fotovoltaicas

##### **5.1 Lineamientos mínimos del modelamiento energético**

Se propone desarrollar un modelo energético aplicable a plantas solares fotovoltaicas, que debe considerar los siguientes lineamientos:

- Se deben tener medidas horarias en el sitio del proyecto de mínimo 1 año de datos de Temperatura ambiente e Irradiación horizontal.
- Se debe tener información de la localización del parque eólico, así como de la distribución y ubicación de cada grupo de paneles dentro del parque.
- Se debe tener en cuenta el tipo de tecnología de paneles a utilizar (una cara, dos caras, material, u otras).
- Se debe tener en cuenta el tipo de estructura a utilizar (seguidor, seguidor a un eje, u otros conforme avance la tecnología).
- Se deben tener en cuenta pérdidas por temperatura.
- Se deben tener en cuenta pérdidas por tipo de estructura.
- Se debe tener en cuenta las pérdidas eléctricas desde los paneles hasta el punto de conexión al SIN.

- Se debe tener en cuenta el número de inversores y sus características técnicas, así como la configuración de número de paneles conectados a cada inversor.
- Se debe tener en cuenta el tiempo de operación de los paneles y el efecto de la degradación de la producción de energía de los paneles en el tiempo.
- Se debe incluir en el modelamiento el efecto de la Indisponibilidad Histórica Forzada (IHF) de la planta.
- Se define una franja horaria de cálculo de producción de energía 7 am a 5 pm, acorde con la disponibilidad del recurso y del aporte esperado de las plantas solares al SIN.
- El modelo debe entregar la energía horaria que corresponda con la serie de datos que ingresan al modelo (al menos 10 años).

Se encargará al C.N.O. el desarrollo de un acuerdo que defina como realizar el modelamiento energético de los parque solares fotovoltaicos. El C.N.O. deberá definir en el Acuerdo las variables y parámetros adicionales que considere pertinentes para este modelamiento.

## **5.2 Cálculo de la ENFICC y verificación de la energía firme del CND**

Como se establece en el numeral anterior, el modelamiento energético de las plantas solares fotovoltaicas debe permitir calcular la producción de energía horaria del parque para el período correspondiente a la serie de datos ingresada, que es de mínimo 10 años. Posteriormente, los valores de energía horaria deben agregarse de forma mensual para todo el período de cálculo, y los valores de energía mensual dividirse por el número de día de cada mes para encontrar el valor diario equivalente de la energía mensual. El menor valor de todas las energías mensuales, en kWh/día, define la ENFICC de la planta, siempre que no supere la energía que puede producir diariamente el parque operando a plena carga.

El CND debe tener la posibilidad de verificar el cálculo de la ENFICC de plantas solares fotovoltaicas, tal como es parte de los procedimientos previstos para la asignación de OEF a plantas de generación. Para tal fin, ahora es el CND el que deberá desarrollar un aplicativo de cálculo automático para que, a partir del ingreso de los parámetros de cálculo, se construya el modelamiento energético y se obtenga directamente la ENFICC de una planta solar fotovoltaica. De esta manera, el cálculo o verificación de ENFICC a cargo del CND consistirá en utilizar los parámetros declarados por los representantes de los proyectos para validar el cálculo de la energía firme, de forma análoga a como se hace para las plantas hidráulicas.

Para lo anterior, el C.N.O. debe desarrollar en detalle el procedimiento de modelamiento energético, en el sentido de que queden claramente definidos los valores y parámetros de entrada, los cuales deberán ser declarados por los agentes en formatos que definirá la Comisión en resolución aparte. Y a partir de lo anterior, el CND debe desarrollar el aplicativo de cálculo.

Por consiguiente, el C.N.O. tendrá como tareas ajustar y complementar el desarrollo que tiene actualmente sobre el Acuerdo de modelamiento energético de plantas solares fotovoltaicas<sup>1</sup>, incluyendo definir los parámetros que deben declarar los agentes para que la CREG los adopte por resolución u otro mecanismo. Y el CND tendrá como tarea el desarrollo del aplicativo que materialice el Acuerdo.

Finalmente, con el fin de dar uniformidad al cálculo de todos los agentes, la ENFICC se calculará con el aplicativo de modelamiento energético que desarrolle el CND. Esta herramienta de cálculo deberá ser de uso libre, para utilización de los interesados en participar en mecanismos de asignación de OEF y para que el mismo CND pueda realizar el cálculo o la verificación de la energía firme, entre otras razones.

De esta manera se espera obtener un cálculo de ENFICC más estándar y más ajustado a las características particulares de los parques solares, y que tenga un tratamiento similar al que se da en otras metodologías de cálculo de ENFICC como es el caso de las plantas hidráulicas.

En términos de su implementación se deberá expedir de manera oportuna los formatos para declaración de parámetros como parte de la Resolución CREG 071 de 2006, para que el CND pueda realizar los cálculos de ENFICC.

### **5.3 Tratamiento de datos previos**

Actualmente el Acuerdo del C.N.O. no incluye tratamiento de datos atípicos que pueden tenerse en la medición en sitio. Para tal fin se encuentra conveniente incluir dentro de los Acuerdos dicho tratamiento, previo a la aplicación del modelamiento energético.

Con esto se espera mejorar la calidad de los datos para la aplicación de la metodología de cálculo de energía firme.

### **5.4 Metodología para plantas sin información en sitio**

Cuando se expidió la Resolución CREG 201 de 2017, esta no contempló una metodología de cálculo de ENFICC con datos tomados completamente de una fuente secundaria, sin medición directa en el sitio del proyecto. Esto, con base a las recomendaciones encontradas en la literatura académica, tal como se explica en el documento soporte CREG-115 de 2017, respecto a la mejor práctica de contar al menos con un año de datos en sitio para una mejor representación del recurso disponible y realizar una mejor estimación de las series de datos en el largo plazo.

Las referencias del citado documento soporte son las siguientes: (Suri, 2016), (M. Schnitzer C. T., The impact of solar uncertainty on project financeability: mitigating energy risk through on-site monitoring, 2012), (S. Moreno-Tejera, 2014), (National-Renewable-Energy-Laboratory-(NREL), 2015 ), (C. Thuman, 2012) y (M. Schnitzer C. T., Reducing

---

<sup>1</sup> El CNO está adelantando con la Universidad de los Andes el desarrollo de metodología de modelamiento energético de plantas solares fotovoltaicas.

uncertainty in solar energy estimates: Mitigating Energy Risk through On-Site Monitoring, 2012).

En este sentido se considera que la mejor alternativa para el cálculo de la energía firme de una planta es con base en datos en sitio, y por tanto debe requerirse que se cuente con mediciones en sitio de al menos un año para el cálculo de ENFICC. Esto considerando que dicha información es un insumo básico para los estudios de factibilidad, estructuración y desarrollo de estos proyectos, los cuales deben estar avanzados al momento de, por ejemplo, participar en una subasta de expansión del Cargo por Confiabilidad.

Por otro lado, se han recibido solicitudes de agentes del sector sobre la posibilidad de participar en los procesos del cargo por confiabilidad sin requerir que se tenga datos de medición en sitio. Esto con el fin de incrementar la posibilidad de participación en los mismos previo a desarrollar la campaña de medición, y sobre la base de disponibilidad de datos con fuentes secundarias, las cuales se argumenta han aumentado en su cantidad y calidad.

Aun cuando, como se señala arriba, lo preferible es realizar el cálculo de la ENFICC con medición en sitio, con el fin de valorar la solicitud anterior, se analizó el impacto de calcular una ENFICC sólo con datos de fuentes secundarias, entendiendo que esto puede introducir un error de magnitud significativa en el cálculo de la energía obtenible de una planta solar. De hecho, la cuantificación del error de la medición con fuente secundaria frente a la medición en sitio depende tanto de la fuente secundaria como del sitio específico, por lo que no se presta a una generalización.

Conforme a la literatura analizada por la Comisión y las referenciadas citadas, los errores en el pronóstico de la producción de energía eléctrica con plantas solares son altamente sensibles a ausencia de datos en el sitio de la planta o no son precisos (M. Schnitzer P. J., 2012)<sup>2</sup>. Es decir, no contar con mediciones apropiadas en el sitio de ubicación de los recursos de generación conlleva mayor incertidumbre en el cálculo de la energía de este tipo de plantas, afectando la firmeza del cálculo del producto del Cargo por Confiabilidad.

En la referencia citada se señalan incertidumbres observadas asociadas a la estimación del recurso solar con fuentes secundarias entre 9% y 16%, y también se indican diferencias observadas de estimaciones con diferentes fuentes secundarias entre 10% y 20%. Dado que la producción de energía de estas plantas también depende de otras variables, como la temperatura ambiente, si se considera el error compuesto la incertidumbre en la estimación de la producción de energía de un parque solar puede alcanzar valores bastante superiores a 20%, cuando no se tienen datos de medición en sitio.

Es entendible entonces que la práctica estándar recomendada para la industria de la energía solar –y en general para las energías renovables– es, reiteradamente, la

---

<sup>2</sup> M Schnitzer et al. *Solar input data for photovoltaic performance modeling*. IEEE, 2012. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6318227>

validación del recurso disponible con información de datos en sitio, para disminuir el error de estimación de la energía que puede producir un determinado parque solar (NREL, 2017)<sup>3</sup>.

De acuerdo con lo anterior, y con el propósito de permitir la participación de más agentes en el mercado de confiabilidad, considerando los riesgos asociados, se propone que sea posible optar por un cálculo de ENFICC solo con información de fuentes secundarias, bajo la condición que solo el 60% de dicho cálculo podrá ser utilizado en un proceso de asignación de OEF. Lo anterior como se señaló anteriormente, estaría asociado a prevenir errores en las mediciones con fuente secundaria superiores a 20%, que es un valor plausible. Adicionalmente, con el fin de mitigar el riesgo de usar fuentes secundarias no suficientemente confiables, el C.N.O. debe definir cuáles son las fuentes que pueden usarse para la aplicación de la metodología de cálculo de ENFICC.

Como impacto se espera que todas las plantas puedan aplicar la misma metodología de cálculo de energía firme, basada en una serie de al menos diez años de datos horarios, con la diferencia que aquellas que no cumplan los requisitos de la campaña de medición les aplique un margen de incertidumbre del 40% para mitigar los riesgos de cálculo en la ENFICC. En caso de contar con al menos un año de medición en sitio y cumplir los requisitos de fuente secundaria, no se aplica dicho margen.

### **5.5 Validación de información de datos en sitio (cálculo con datos en sitio)**

Actualmente el Acuerdo del C.N.O. incluye tratamiento de datos en sitio fijando un valor máximo de un 5% de valores ausentes del año de datos en sitio. No obstante, no se encuentra la referencia de la justificación de dicho valor o criterios adicionales para validar datos.

Por lo anterior, se encuentra conveniente que el C.N.O. revise y defina los criterios que deben aplicarse para establecer la validez de los datos para el cálculo y el número mínimo de datos válidos para la aplicación de la metodología, con base en estándares de la industria solar y de tal forma que no se desmejore el método de extrapolación de datos de diez años.

El impacto esperado en este caso es asegurar la integridad y uniformidad de las series de datos utilizadas para el cálculo de la ENFICC de las plantas solares.

### **5.6 Factor de Correlación de Pearson (cálculo con datos en sitio)**

En la Resolución CREG 201 de 2017 no se definió el factor de correlación de Pearson ( $r$ ) para ninguno de los parámetros que deben ser declarados. No obstante, en el Acuerdo del C.N.O. 1042 si se establecieron factores de correlación de Pearson entre la medida en sitio y la de fuente secundaria, de la siguiente manera:

---

<sup>3</sup> Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition. NREL, 2017. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/68886.pdf>

- Para irradiación horizontal (GHI) un  $r$  mayor o igual a 0,9
- Para temperatura ambiente (TA) un  $r$  mayor o igual a 0,84

Sobre estos factores se propone como alternativa mantener el valor de  $r$  del C.N.O. para GHI. No obstante, el valor de  $r$  de la TA se fijará en mayor o igual a 0,87, utilizando un factor de correlación de Pearson asociado a valores de ajuste estadístico que se consideran aceptables, esto es, un coeficiente de determinación  $r^2=0,75$ , que es igual a un coeficiente de Pearson  $r$  de 0,87. Para mayor información se pueden consultar las referencias del pie de página<sup>4</sup>.

Para valorar el impacto esperado de este ajuste marginal en el factor de correlación, se tiene en cuenta que hasta el momento todas las plantas solares fotovoltaicas a las que se les ha calculado ENFICC para asignación de OEF cumplieron con un factor de correlación de Pearson superior a 0,9 para GHI.

## 5.7 Valor de IHF

En el modelamiento energético que debe desarrollar el Acuerdo del C.N.O., se encuentra conveniente que estos incluyan el efecto del IHF sobre el cálculo de la energía firme, de manera análoga a como ocurre con la ENFICC de otras tecnologías que si lo incluyen.

De esta manera se espera un cálculo más preciso de la energía firme esperada y mayor uniformidad con otras metodologías de ENFICC.

## 5.8 Ventanas de tiempo de cálculo

Como se ha explicado anteriormente, la metodología vigente para el cálculo de la ENFICC de plantas solares utiliza una ventana de tiempo mensual. Es decir, se identifica la mínima producción de energía mensual, la cual se expresa en un valor equivalente promedio diario.

Para valorar el impacto de utilizar otras ventanas de tiempo de cálculo, se tomó información de dos proyectos en desarrollo (designados de aquí en adelante por las letras A y B), con el fin de calcular la energía firme que resultaría con base en utilizar varias ventanas de tiempo. Se advierte que los ejercicios realizados tienen un propósito meramente ilustrativo y solo de referencia para el presente análisis.

Con la información del recurso solar y otros datos de cada proyecto, se procedió a obtener la energía que resulta de aplicar la fórmula de que trata la Resolución CREG 201 de 2017 pero conforme a la ventana de tiempo correspondiente. Así, se estimó la energía firme (equivalente promedio día) que se tendría para las siguientes ventanas de tiempo de cálculo.

---

<sup>4</sup> Para más información ver <https://people.duke.edu/~rnau/rsquared.htm>

- Tipo horario: se toma la energía horaria para un periodo de 10 años. La ENFICC de referencia es el menor valor de todas las horas del periodo de 10 años, extrapolado a un día. Solo se tienen en cuenta las horas donde existe irradiación.
- Tipo diario: se agrega la energía producida en todas las horas de un día, para todos los días del periodo de 10 años. La ENFICC de referencia es el menor valor de todas los días del horizonte de 10 años. Solo se tienen en cuenta las horas donde existe irradiación.
- Tipo semanal: se agrega la energía horaria producida en todas las horas de un período de 7 días y se divide entre 7. La ENFICC de referencia es el menor valor (promedio diario) de todos los períodos consecutivos de 7 días en el horizonte de 10 años. Solo se tienen en cuenta las horas donde existe irradiación
- Tipo mensual: se agrega la energía horaria producida en todas las horas de un mes y se divide por el número de días del mes correspondiente, para todos los meses del período de 10 años. La ENFICC de referencia es el menor valor (promedio diario) de todos los meses del horizonte de 10 años. Solo se tienen en cuenta las horas donde existe irradiación.

Con las ventanas anteriores se encuentra la ENFICC de referencia en cada caso, los cuales se muestran en la siguiente tabla, expresados en como valores porcentuales respecto del valor mensual (se considera que el valor mensual es el 100%):

**Tabla 1. Enficc de referencia por tipo de ventana de cálculo**

<b>Planta</b>	<b>Horario</b>	<b>Diario</b>	<b>Semanal</b>	<b>Mensual</b>
<b>A</b>	0,002%	20,31%	88,41%	100%
<b>B</b>	0,004%	26,60%	91,19%	100%

Del ejercicio anterior pueden extraerse las siguientes conclusiones sobre el período de 10 años de referencia:

- Existen horas en que se tiene un recurso casi nulo para generar, y por lo tanto no se puede asegurar un suministro mínimo diario de tipo continuo. Esto sumado a que no se tienen en cuenta las horas donde no existe radiación, en las cuales la energía es cero si se tuvieran en cuenta.
- En la ventana diaria se observa que siempre se tiene algún valor de producción de energía diario, aunque el valor mínimo puede ser bajo tanto en términos absolutos como comparado con el valor mensual.

- En la ventana semanal se observa que sobre períodos de 7 días la producción promedio diaria es más uniforme, aunque el valor mínimo sigue siendo menor comparado con el valor mensual.

Vale la pena señalar que las obligaciones de energía firme, OEF, son de cumplimiento diario, y en ese sentido una ventana de ese tipo sería más compatible con la forma de entrega de OEF. Al considerar una ventana de tiempo mayor a la diaria se reconoce implícitamente dos aspectos. El primero es la mayor variabilidad que existe en el corto plazo en la disponibilidad del recurso solar para la generación de energía, como se observa en las ventanas de tiempo más cortas. El segundo consiste en que, al tomar una ventana de tiempo de cálculo más larga, se asume que las variaciones en la producción de energía de corto plazo de estas plantas pueden ser compensadas por otras plantas del sistema, durante un período crítico en el cual se hicieran exigibles las OEF.

Al utilizar una ventana de cálculo de ENFICC más larga, como la mensual, se reconoce entonces la capacidad de estas plantas de aportar energía firme no continuamente sino sobre un período de tiempo, así como su complementariedad con otras fuentes de generación como la hidráulica, que tiene también un cálculo de ENFICC con resolución mensual y que gracias a su capacidad de almacenamiento puede modular su producción de energía durante ese período de tiempo. Frente a la alternativa de utilizar ventanas de cálculo más cortas para las plantas solares, se podría tener mayor certidumbre respecto a su producción diaria de energía, pero a costa de una muy baja valoración de la contribución de estas plantas a la confiabilidad del sistema -como se ilustra en el ejercicio anterior-, y no se aprovecharía la complementariedad señalada con otras fuentes de energía.

Es importante advertir que lo anterior no equivale al cálculo de una ENFICC estacional, lo cual conllevaría a definir productos diferenciados de confiabilidad y a un cálculo integrado del aporte concurrente a la firmeza de todos los recursos de generación, con el fin de incorporar el análisis de complementariedad en la determinación de la energía firme de todas las plantas del sistema. Un análisis de este tipo está por fuera del objeto de la resolución que acompaña este documento, que solo define una metodología independiente para el cálculo de la ENFICC de las plantas solares, y podrá ser abordado en un futuro por la Comisión en el contexto de estudios y evaluación de cambios estructurales en las métricas de confiabilidad del SIN.

Así las cosas, y por las razones expuestas anteriormente, la Comisión considera apropiado mantener la ventana de tiempo mensual para el cálculo de energía firme de las plantas solares. De esta manera se valora la contribución a la firmeza de estas plantas en períodos mensuales, sin que deban entregar la energía firme de forma continua, y aprovechando su complementariedad con las plantas hidráulicas con regulación mensual y que también tienen un cálculo de ENFICC con resolución mensual.

## **5.9 Suministro de Información por etapas**

Con la metodología actual, con el aplicativo publicado por la Comisión se tienen todos los datos de la planta. No obstante, a partir de un cambio de metodología, también se precisa

de la información utilizada en el modelamiento energético para análisis posteriores del tipo regulatorio y para planeación operativa del sistema. Por tal razón, se propone establecer las siguientes reglas para el suministro de información según la etapa del proyecto:

**(a) Etapa previa de declaración de parámetros:**

Para nuevas asignaciones de energía firme se deben declarar todos los parámetros para calcular la energía firme, incluyendo toda la información de soporte requerida en los Acuerdos del C.N.O. Para esto el Consejo deberá definir los parámetros de entrada al modelo y la CREG deberá publicar de forma posterior los formatos para su declaración.

Se espera así contar con toda la información con que se participa en los procedimientos de asignación de OEF, como ocurre en otras metodologías de cálculo de ENFICC, y por tanto se tendrá mayor transparencia. Igualmente se contará con información apropiada para realizar análisis ex post de la regulación y para funciones propias del operador del sistema.

**(b) Etapa luego de la asignación de OEF y hasta la entrada en operación:**

Luego de haber informado los parámetros para el cálculo de la ENFICC y obtenida una asignación de OEF por una planta en algún mecanismo del cargo por confiabilidad, aplicarían las siguientes reglas:

- Las plantas que tengan cálculo de ENFICC con datos de medición en sitio, deberán seguir enviando las medidas en sitio con resolución horaria, y una periodicidad mensual hasta el momento en que entran en operación. El CND definirá la forma de remitir la información.
- Las plantas que tengan cálculo de ENFICC sólo con datos de fuentes secundarias deben iniciar a enviar la información de medición en sitio a partir del séptimo mes luego de que le quede asignada las obligaciones de energía firme, con una periodicidad mensual. El CND debe definir la forma de remitir esta información.

En consecuencia, un proyecto con obligaciones de energía firme asignadas debe implementar el proceso de medición y reporte de datos en sitio dentro del plazo especificado, el cual es suficientemente amplio para implementar la campaña de medición.

- Las plantas con obligaciones de energía firme previamente asignadas tendrán un plazo de 3 meses para iniciar el envío de la información de medición horaria en sitio, con periodicidad mensual. Esto, conociendo que todas las plantas solares que han participado en mecanismos de asignación de OEF a la fecha lo han hecho con la metodología de datos en sitio, por lo tanto, se entiende que ya cuentan con estaciones de medida. Igualmente, el CND debe definir la forma de remitir esta información.

Tal como se explicó en la etapa previa, con estos requerimientos de reporte de información en sitio se contará con información oportuna y actualizada para los análisis regulatorios y los procesos operativos del sistema. Esto bajo el entendido que los agentes con asignaciones previas de OEF deben continuar con el reporte de información en sitio y los agentes con nuevas asignaciones de OEF deberán desplegar inmediatamente campañas de medición, en caso de que aún no cuenten con ellas. Se resalta que el requerimiento de contar con datos de medición en sitio es una actividad inherente al desarrollo del proyecto más que un costo de cumplimiento de la regulación.

### **(c) Etapa de operación:**

Una vez en operación las plantas, aplican las obligaciones de reporte de información establecidas en las resoluciones CREG 060 de 2019 y 148 de 2021. Dada la etapa de transición prevista en la Resolución CREG 148 de 2021, las plantas con obligaciones del cargo por confiabilidad que se conecten al SDL deberán seguir enviando la información horaria de medidas en sitio de forma mensual, hasta que finalicen dicha transición.

### **5.10 Actualización del modelamiento energético**

Dado que se propone utilizar una metodología con base en el modelamiento energético de las plantas y debido al continuo desarrollo tecnológico de este tipo de generación, se ha encontrado conveniente prever una revisión periódica, al menos cada 5 años, del protocolo de modelamiento energético. Lo anterior como un insumo para consideración de la CREG, para estudiar la conveniencia o no de realizar ajustes al modelo.

De esta manera se podrá evaluar ajustes y mejoras al modelamiento energético, incorporando avances tecnológicos y la experiencia recogida en su aplicación.

### **5.11 Dictamen técnico, verificación de ENFICC y auditoría de parámetros declarados**

Para participar en un mecanismo de asignación de OEF, se propone mantener el requerimiento de contar con un dictamen técnico respecto de las series de datos en sitio que se declaran para el cálculo de la ENFICC. Esto con el fin de verificar que las series se ajusten a lo requerido en la regulación y en el Acuerdo del C.N.O., dado que constituyen un insumo fundamental para un cálculo confiable de la energía firme de la planta. Esto se equipará con el requerimiento análogo que se hace a las series de aportes mensuales declaradas por las plantas hidráulicas para el cálculo de ENFICC y que deben estar aprobadas por el C.N.O.

Por otra parte y como se mencionó anteriormente, para estas plantas se propone mantener el procedimiento de verificar el cálculo de ENFICC que debe realizar el CND en los procesos de asignación de OEF. Este procedimiento se extiende para incluir la verificación del modelamiento energético con la aplicación automatizada que defina el CND para tal efecto. Por consiguiente, no es necesario prever la auditoría actual al

modelamiento energético como sucedía en el caso de parques eólicos, por lo tanto, se propone eliminar dicho requerimiento.

Respecto a las auditorías de los parámetros declarados que la CREG normalmente ordena realizar después de una subasta de asignación de OEF, estas también deben aplicar a las plantas solares fotovoltaicas, y en la resolución se propone definir los criterios para revisar la información de parámetros y los requisitos mínimos para llevar a cabo la auditoría.

De esta manera se eliminan reprocesos respecto a la verificación de la información declarada y al cálculo de la ENFICC de estas plantas.

### **5.12 Aplicación de la nueva metodología**

Las modificaciones propuestas a la metodología de cálculo de ENFICC de plantas solares aplicarían para las asignaciones que se realicen desde la entrada en vigencia de la resolución en adelante. En este sentido, la Comisión encuentra más conveniente derogar la Resolución CREG 201 de 2017 que define la metodología vigente y expedir una nueva resolución con la metodología que incorpora los cambios propuestos.

Vale la pena señalar que lo anterior no modifica las obligaciones de energía firme previamente asignadas. Ahora bien, respecto a cualquier cambio en la ENFICC que resulte de los procesos de verificación anual, estos serán tratado de acuerdo con lo establecido en la Resolución CREG 127 de 2020.

### **5.13 Plazo de implementación del C.N.O.**

Dado que el C.N.O. ya viene desarrollando y adelantando los análisis para los ajustes de los protocolos de modelamiento energético de plantas solares fotovoltaicas, se dará un plazo de 3 meses calendario para la finalización de los mismos, incluyendo la oportunidad de que agentes y terceros interesados puedan comentar sobre la propuesta de ajuste del C.N.O.

El CND tendrá un plazo de dos meses para el desarrollo y publicación del aplicativo de cálculo de ENFICC, y los cuales serán contados a partir de la finalización del plazo anterior del CNO.

## **6. PROPUESTA**

Producto de los análisis que se presentan en este documento, se propone a la Comisión publicar para consulta el proyecto de resolución que modifica la metodología de cálculo de ENFICC vigente, con las modificaciones aquí descritas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- C. Thuman, M. S. (2012). Quantifying the accuracy of the use of measure-correlate-predict methodology for long-term solar resource estimates. *World Renewable Energy Forum*.
- H. S. Huang, J. C. (2011). Performance and Availability Analyses of PV Generation Systems in Taiwan. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 5(nº 6), 731-735,.
- K. Hunt, A. B. (2015). Availability of utility-scale photovoltaic power plants. *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 1-3. doi:10.1109/PVSC.2015.7355976
- M. Schnitzer, C. T. (2012). Reducing uncertainty in solar energy estimates: Mitigating Energy Risk through On-Site Monitoring. *AWS True Power*.
- M. Schnitzer, C. T. (2012). The impact of solar uncertainty on project financeability: mitigating energy risk through on-site monitoring. *ASES Annual Conference*, 1-5.
- M. Schnitzer, P. J. (2012). Solar input data for photovoltaic performance modeling. *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 003056-003060. doi:10.1109/PVSC.2012.6318227
- Nasse, U. J. (2003). Performance analysis and reliability of grid-connected PV systems in IEA countries. *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - IEEE*, vol. 3, 2148–2151,.
- National-Renewable-Energy-Laboratory-(NREL). (2015 ). Applying Solar Resource Data to Solar Energy Projects. *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications*, 163-164.
- S. Moreno-Tejera, E. P.-A.-G.-B.-P. (2014). Assessment of a Global-to-Direct empirical model for the long-term characterization of Direct Normal Insolation. *Energy Procedia*, 2377-2386. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.252.
- Suri, T. C. (2016). Site-adaptation of Satellite-based DNI and GHI Time Series: Overview and SolarGIS Approach. *AIP Conference Proceedings*, 1-11. doi:https://doi.org/10.1063/1.4949234
- T. Oozeki, T. Y. (2010.). An analysis of reliability in the early stages of photovoltaic systems in Japan. *Wiley InterScience: Progress in photovoltaics: Research and Applications*, vol. 18(nº 5), 363-370,.