



# **Pronósticos de generación de energía eléctrica a partir de fuentes variables**

## **Revisión del estado del arte**

**Diciembre 2017**

Gerencia Centro Nacional de Despacho  
Dirección Planeación de la Operación  
Octubre 06, 2017

## Pronósticos de generación de energía eléctrica a partir de fuentes variables

### Revisión del estado del arte

Una alta integración de fuentes de energía solar, eólica, y de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), tal como la que proyecta la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) para el año 2023, generará nuevos retos para la planeación y la operación del sistema interconectado nacional (SIN). Entre estos desafíos, uno de gran importancia es el reto de afrontar la alta variabilidad y baja predictibilidad de la generación eléctrica a partir de este tipo de plantas, para lo cual se hace necesario contar con herramientas que permitan pronosticar su variabilidad.

En este documento se exponen de manera concisa las herramientas de pronóstico que ayudarán a afrontar la variabilidad de estas fuentes. Brevemente estudiaremos tanto la información que se requiere para el desarrollo e implementación de pronósticos de generación, así como las diferentes metodologías que estos utilizan. Como veremos, se utilizan diferentes soluciones para diferentes horizontes temporales y diversas fuentes de generación.

Es importante recalcar que uno de los insumos básicos para el desarrollo de estos pronósticos de generación es la información meteorológica, además de la información eléctrica de las plantas. Dicha información meteorológica comprende tanto información tomada directamente en las plantas de generación, como información proveniente de modelos meteorológicos o mediciones remotas. En este documento se hace énfasis en cómo se utiliza esta información meteorológica para obtener pronósticos de generación eléctrica de las fuentes variables, lo cual es el objetivo de los pronósticos de XM.







## **Contenido**

<b>Objetivo de los pronósticos de generación</b>	<b>1</b>
<b>Antecedentes</b>	<b>2</b>
<b>Generalidades de los pronósticos de generación</b>	<b>3</b>
Predicción cercana al tiempo real	4
Predicción para el despacho y corto plazo	5
Pronósticos agregados	6
¿Qué errores se pueden esperar de los pronósticos de generación en Colombia?	6
<b>Particularidades de la predicción de la generación eléctrica de plantas solares</b>	<b>7</b>
<b>Particularidades de la predicción de la generación eléctrica de plantas eólicas</b>	<b>9</b>
<b>Predicción de la generación eléctrica de pequeñas centrales hidroeléctricas</b>	<b>11</b>



## Objetivo de los pronósticos de generación

El objetivo de los pronósticos de generación que se desarrollarán en XM, es el de guiar la operación del SIN en horizontes que van desde el tiempo real, hasta el corto plazo, bajo escenarios con alta integración de fuentes variables. Estos pronósticos se desarrollarán e implementarán para el cálculo de la energía que producirán las plantas solares, eólicas, y las pequeñas centrales hidroeléctricas. Todo esto, con el fin de prever su variabilidad y tenerla en cuenta en la operación del SIN de forma confiable, segura y económica. Los horizontes, frecuencias, y resoluciones temporales que se han identificado para estos pronósticos se resumen en la Figura 1.

En este documento estudiaremos las diferentes metodologías que se usan para generar pronósticos con estas características.

	Pronósticos Corto Plazo	Pronósticos Despacho	Pronósticos Redespacho	Pronósticos Tiempo Real
Horizonte	1 semana	40 horas	36 horas	65 minutos
Resolución	1 hora	1 hora	1 hora	5 minutos
Frecuencia	1 semana	1 día	1 hora	5 minutos
XM	Estudios energéticos	Programar reservas	Programar reservas	Balance generación
Agentes		Disponibilidad recurso	Disponibilidad recurso	

Figura 1. Pronósticos necesarios para la integración de fuentes variables en la operación y planeación del SIN

## Antecedentes

Los pronósticos de la producción de energía a partir de fuentes variables cobran gran importancia para los sistemas de potencia que cuentan con una alta integración de energías renovables. En países donde se ha experimentado un acelerado crecimiento de las fuentes de energía renovable se han implementado sistemas de pronóstico como una herramienta fundamental para adaptar la operación de estos sistemas a los nuevos retos que traen consigo las energías renovables. Los pronósticos pueden usarse en todos los horizontes de interés de la operación de los sistemas eléctricos, desde el tiempo real hasta el mediano plazo. Aunque los errores en el pronóstico crecen rápidamente con el horizonte de interés, llevan a hacer un uso más racional de los recursos de generación y a una operación más segura y confiable.

En el caso de la operación del sistema eléctrico colombiano (SEC), se prevé que los pronósticos se utilicen para conocer el balance carga-generación en tiempo real, la programación óptima de unidades en el despacho, la programación óptima de unidades y el cálculo de reservas en el redespacho, así como para la planeación en los escenarios de corto, y tal vez mediano plazo, entre otros procesos, tal como lo demuestra la experiencia en otros países<sup>1</sup>.

Los pronósticos de generación -tal como lo muestran las buenas prácticas internacionales-pueden ser desarrollados por el operador del Sistema Interconectado Nacional (SIN), ser subcontratados con empresas expertas en el tema o implementados al mismo tiempo por ambas partes. En este sentido, la experiencia internacional ha mostrado que es necesario que los operadores eléctricos adquieran el conocimiento sobre la elaboración de estos pronósticos, de tal forma que tengan una mayor conciencia situacional del sistema. Este conocimiento permite al operador entender las limitaciones de los mismos pronósticos y, consecuentemente, hacer uso de las mejores prácticas para su desarrollo y utilización. En el caso colombiano, debido a la gran integración de PCHs, se requerirán desarrollos propios pues no se cuenta con una experiencia internacional amplia para el pronóstico de la generación de las PCHs.

---

<sup>1</sup>Greening The Grid (2016). *Pronóstico De Generación De Energía Eólica Y Solar: Mejorando La Operación Del Sistema*. Disponible en: <http://greeningthegrid.org/resources/factsheets/forecasting-spanish>



## Generalidades de los pronósticos de generación

Para la predicción de la generación tanto de las plantas eólicas, solares, como de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), se usan metodologías que son comunes a cualquier herramienta de predicción. Por lo tanto, se describen primero metodologías que aplican para todas las plantas.

Existen dos metodologías para la predicción que a primera vista pueden parecer opuestos. Uno consiste en analizar valores pasados de una o varias variables de interés para predecir su variabilidad futura, como en los métodos de persistencia, los modelos auto regresivos, y las redes neuronales. El otro consiste en utilizar conceptos físicos para predecir la variabilidad futura, resolviendo ecuaciones que representan el fenómeno de interés. Este es el caso en los modelos meteorológicos globales, los modelos meteorológicos regionales, y los modelos localizados al sitio de la planta, donde se resuelven iterativamente las ecuaciones que capturan la variabilidad de la atmósfera.

Las fortalezas del método estadístico se ven mayormente reflejadas en los pronósticos con horizontes muy cercanos al tiempo real, pues los métodos estadísticos explotan la persistencia de las variables a predecir. Son entonces estos métodos los que cobran mayor importancia para la operación en tiempo real y el redespacho, y tienen la ventaja de no necesitar un alto poder de cómputo para ejecutarse. Estos métodos también han sido usados en el sector eléctrico para estimar la demanda futura del sistema, donde se usa la información histórica de la demanda. Sin embargo, una debilidad importante de los métodos estadísticos, es que pueden obviar eventos extremos si los datos usados para entrenar los modelos no han registrado una cantidad significativa de estos, ya que los métodos se ajustan modelos a la historia observada, pero los modelos pueden fallar para eventos por fuera de esta.

Las fortalezas del método físico se ven mayormente reflejadas en los pronósticos con horizontes de unas cuantas horas a unos cuantos días. Por lo que estos métodos cobran mayor importancia para la programación del despacho y la planeación a corto plazo. Los métodos físicos no dependen de la historia observada pues, a diferencia de los métodos estadísticos, realizan predicciones con base en el conocimiento que se tiene de la física del fenómeno y en observaciones del estado inicial del sistema. Los modelos meteorológicos, por ejemplo, resuelven iterativamente las ecuaciones físicas que describen la atmósfera, partiendo de observaciones de su estado actual, y dando una idea de cómo ésta variará en el futuro. Sin embargo, una debilidad importante de los métodos físicos es que no todos los fenómenos pueden resolverse explícitamente y deben ser representados mediante aproximaciones que introducen errores en los modelos. Esto se debe a que para resolver las ecuaciones físicas es necesario hacerlo numéricamente, en mallas espaciales y en varios saltos temporales, por lo que los fenómenos que tienen escalas menores al tamaño de la malla u ocurren en tiempos menores a los saltos temporales deben ser aproximados. En la práctica esto lleva a que los modelos tengan desviaciones, respecto a los datos medidos, que deben ser corregidos con métodos estadísticos antes de usar los modelos para generar pronósticos.

Por lo tanto, la distinción entre los métodos físicos y estadísticos es difusa en la práctica, y es necesario combinar ambos métodos para obtener los mejores resultados. Para obtener predicciones de viento, precipitación o irradiación es necesario calibrar los pronósticos de modelos meteorológicos a los datos medidos en el sitio mediante métodos estadísticos, removiendo así las desviaciones inherentes de los modelos meteorológicos. Además, para obtener predicciones continuas, desde el tiempo real hasta el corto plazo, se deben usar métodos estadísticos para combinar modelos físicos y modelos estadísticos. Los métodos estadísticos también son usados para combinar de forma óptima diferentes predicciones de, por ejemplo, diferentes proveedores. Finalmente, existen también métodos donde no es clara su distinción como un método físico o estadístico. Este es el caso, por ejemplo, cuando se instalan cámaras que continuamente monitorean el estado las nubes con el fin



de predecir la irradiación horizontal global. En este caso se resuelve el movimiento y profundidad de las nubes para predecir su movimiento, lo que se podría describir como un método físico<sup>2</sup>, pero la estimación de la irradiación se hace por métodos estadísticos. La situación es similar cuando se instala una torre meteorológica viento arriba de una planta eólica con el fin realizar predicciones cercanas al tiempo real.

En cualquier caso, e independiente de la metodología, el objetivo de estos pronósticos es el mismo, obtener pronósticos de la generación eléctrica. Para esto, los métodos pueden calibrarse para pronosticar directamente la generación de las plantas, o pueden obtenerse después de calibrar los pronósticos al recurso que se aprovecha. En el primero de los casos podría llegar al punto de omitirse por completo la información meteorológica de las plantas, pero se tendría la desventaja de no conocer en detalle el recurso aprovechado, ni el potencial actual de la planta en caso de no tener unidades generando a máxima capacidad, pues la generación se ve afectada por la operación misma de las plantas. En el segundo caso, cuando se pronostica el recurso, se debe contar con un modelo de la planta que permita convertir el pronóstico del recurso en un pronóstico de generación (Figura 2). Esto tiene la ventaja de que se obtiene así información del recurso que es independiente de la operación de la planta.

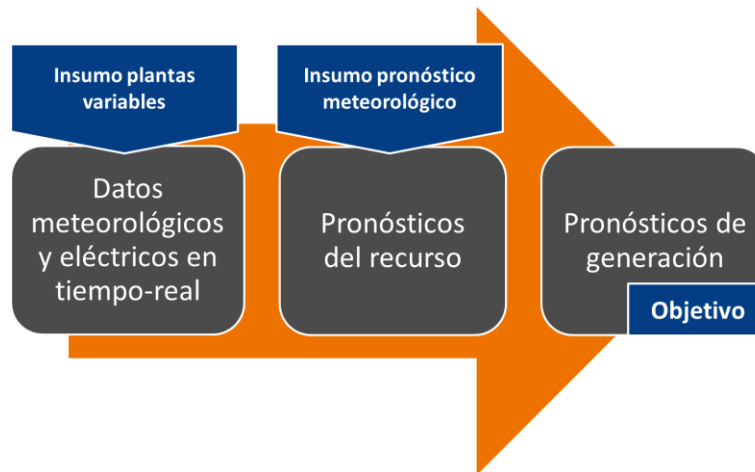


Figura 2. Esquema de elaboración de los pronósticos de la generación de las fuentes de energía renovable, en especial para los horizontes del despacho al corto plazo, a partir de datos meteorológicos y pronósticos meteorológicos

### ***Predicción cerca al tiempo real***

La predicción para el tiempo real, en el orden de unos pocos minutos a unas pocas horas, se basa principalmente en la persistencia de las variables meteorológicas o de la potencia de las plantas de generación. El caso base de estas predicciones se conoce como persistencia, y consiste simplemente asumir que la generación  $P$ , o el recurso, no cambia en el tiempo. Es decir

$$P_{t+\Delta t} = P_t$$

<sup>2</sup> Acá el calificativo “cinemático” en vez de “físico” probablemente es más adecuado.



Como es de esperar, asumir persistencia del sistema solo es aceptable por un muy corto tiempo, y mejores predicciones se obtienen al considerar no solo el valor instantáneo de la potencia si no, también, sus valores pasado. Los modelos autorregresivos hacen precisamente esto, en el caso más sencillo (AR1):

$$P_{t+\Delta t} = \alpha + \beta P_t$$

Donde se podrían también incluir variables exógenas ( $A$ ) simplemente como

$$P_{t+\Delta t} = \alpha + \beta P_t + \gamma A$$

Donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son constantes que se obtienen a partir de una regresión lineal. Además, existen modelos autorregresivos más complejos como los modelos autorregresivos de media móvil (ARMA) y los modelos autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA) que capturan mejor esta variabilidad al usar más información histórica de la variable que predicen. Adicionalmente existen otra multitud de métodos, como las redes neuronales artificiales que permiten considerar relaciones no lineales entre los datos.

## Predicción para el despacho y corto plazo

La predicción en horizontes de interés para el corto plazo y el despacho, en el orden de unas cuantas horas a unos cuantos días, se basa principalmente en modelos meteorológicos globales, regionales, y de meso-escala. Los modelos meteorológicos globales más reconocidos se muestran en la Tabla 1.

Agencia Meteo	Modelo	Resolución espacial máxima	Resolución temporal máxima	Número de Conjuntos	Disponibilidad
ECMWF	HRES	0.1° (~11km) por 6 días	3h	1	00UTC, 12UTC
	ENS	0.2° (~22km) por 6 días	3h	1 control, 50 perturbaciones + HRES	00UTC, 12UTC
NCEP	GFS	0.25° (~28km)	1h	1	00UTC,06UTC, 12UTC,18UTC
	GEFS	0.5° (~55km) por 8 días	6h	20 perturbaciones	00UTC,06UTC, 12UTC,18UTC
JMA	GSM	0.1875° (~20km)	6h por 3.5 días	1	00UTC,06UTC, 12UTC,18UTC

Tabla 1. Modelos meteorológicos globales de 3 agencias meteorológicas.

Por otra parte, los modelos regionales y de meso-escala son comúnmente desarrollados por agencias meteorológicas locales. En Estados Unidos, por ejemplo, se tiene el North American Mesoscale Forecast System (NAM) que resuelve los modelos WRF y NEMS-NMMB en mallas anidadas tomando como datos de frontera las salidas del modelo GFS de NCEP. En Colombia el IDEAM resuelve dos modelos regionales para Colombia usando una metodología similar, sin embargo, el acceso a este es limitado. También existe la posibilidad en resolver estos modelos por medios propios, pues la mayoría de estos modelos son de código abierto, por lo que se pueden descargar libremente de internet.



En la mayoría de los casos, las variables que se pronostican con los modelos meteorológicos no son directamente aplicables a las aplicaciones de la industria energética. Esto se debe a que históricamente estos modelos se han desarrollado con miras en proveer pronósticos de tiempo a diferentes sectores sociales. Por esto, para obtener pronósticos de variables como la velocidad del viento a 80 metros, lo cual sería de utilidad para un parque eólico, o la irradiación global horizontal, que sería de utilidad para parques solares, es necesario procesar la información de los modelos meteorológicos para así obtener las variables útiles para el sector eléctrico. Además, una vez se obtiene estas variables es necesario calibrarlas para que sean representativas del sitio donde se espera predecir la variable. Esto se conoce en la literatura como Model Output Statistic (MOS), y puede realizarse tanto con regresiones lineales simples como con redes neuronales artificiales (ANN).

## ***Pronósticos agregados***

Otro aspecto importante que debe notarse es que también existe la posibilidad de realizar pronósticos agregados de las diferentes fuentes de generación. Internacionalmente existe gran experiencia para hacer esto con la generación eólica y solar, y también existen metodologías en la literatura científica para hacerlo para las PCHs.

Algo importante de este enfoque es que lleva a errores muchos menores que los que se obtienen para una única planta de generación, lo que se debe a que los errores de los pronósticos de cada planta se cancelan. Por lo tanto, podrá ser de interés del CND realizar estos pronósticos agregados, por ejemplo, a subestaciones o a departamentos.

## ***¿Qué errores se pueden esperar de los pronósticos de generación en Colombia?***

Hay varios aspectos a considerar en esta pregunta. Se debe diferenciar el error que se espera en cada horizonte temporal, separar el error de las plantas del error total del sistema, diferenciar el error que se espera en diferentes geográficas, y definir como se evalúa el error. Todo esto incide en la magnitud del error que se observa.

Primeramente, el horizonte de pronóstico influye fuertemente en el error, éste último aumentando a medida que el horizonte temporal aumenta. Por ejemplo, un reporte reciente de Greening the Grid afirma que los sistemas de pronóstico eólico pueden lograr precisiones del orden del 5% al 7% para pronósticos realizados 2 horas antes, y del 20% para pronósticos del día anterior.

Otro aspecto que afecta el error es la ubicación geográfica de las plantas. Esto es importante tanto por las dinámicas mismas de la meteorología de la región como por la disponibilidad de datos y modelos meteorológicos en la región. En el caso de Colombia ambos aspectos podrían llevar a un error mayor respecto a lo que se espera regiones no tropicales, esto es algo que debe evaluarse para cada planta. La meteorología en Colombia, y en los trópicos en general, es fundamentalmente diferente a aquella de las latitudes extratropicales, pues en los trópicos los efectos convectivos cobran gran importancia. Además, la ausencia de datos meteorológicos y de modelos regionales en Colombia también pueden llevar a errores mayores en el pronóstico que lo que se esperaría de latitudes extratropicales.

Otro punto importante a resaltar es que se cuenta con una alta incertidumbre respecto a los errores que podrán esperarse de las PCHs, pues no hay una amplia experiencia internacional para realizar sus pronósticos. Adicionalmente, debido a la complejidad hidrológica de estas plantas, es de esperar que sus errores puedan ser inclusive mayores a aquellos de las plantas eólicas y solares.



## Particularidades de la predicción de la generación eléctrica de plantas solares

La generación eléctrica de las plantas fotovoltaicas depende principalmente de la irradiación solar que se presenta en el plano de sus paneles, y esta irradiación a su vez depende de la meteorología del sitio donde se encuentra la planta solar. La irradiación depende, entre otros factores, de la nubosidad, de la cantidad de aerosoles y humedad en la atmósfera, de la topografía de la región, y de las edificaciones cercanas. La nubosidad es tal vez el factor más importante, pues su alta variabilidad lleva a grandes rampas en la generación de las plantas fotovoltaicas como las que se observan en la Figura 3 para la planta solar Yumbo de Celsia.

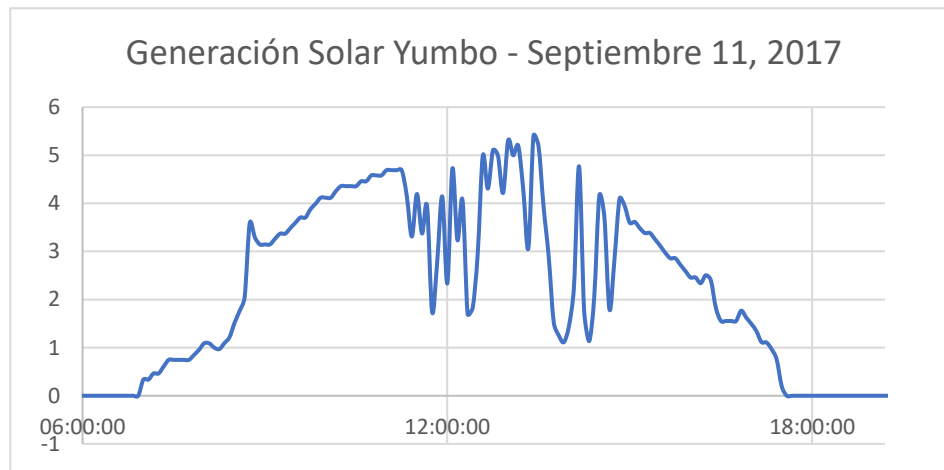


Figura 3. Generación en la Planta Solar Yumbo de Celsia durante el 11 de septiembre del 2017.

Un aspecto importante a notar en la generación de las plantas solares, evidente en la Figura 3, es que su generación es proporcional a la irradiación global horizontal (GHI). Por lo tanto, es común utilizar este hecho para generar los pronósticos de persistencia mediante ecuaciones como la siguiente:

$$k = \frac{GHI}{GHI_{TOP}}$$

Donde  $GHI_{TOP}$  se puede definir como la irradiación que se observaría si no se tuviesen nubes o como la irradiación que se observaría sobre la atmósfera antes de interactuar con ella. Así  $k$  representa en un solo factor el efecto de la meteorología sobre la irradiación que llega a la planta, y el método de persistencia en el caso de las plantas solares consiste en asumir que  $k$  es constante, es decir que la meteorología no cambia, calculando la irradiación como:

$$GHI_{t+1} = k \cdot GHI_{TOP,t+1}$$

Como es de esperar este método solo es válido en horizontes muy cercanos al tiempo real o en situaciones con un cielo despejado, donde la irradiación depende de la variación astronómica. Para horizontes más lejanos otros métodos empiezan a cobrar más validez.



De especial interés es el uso de imágenes satelitales. Las imágenes satelitales permiten obtener estimaciones de la irradiación que se observará en el sitio de los proyectos dentro de las próximas horas con frecuencias de alrededor de 30 minutos. La idea detrás del método con el que se obtienen estas estimaciones es la de evaluar el movimiento de las nubes a partir de una secuencia de imágenes satelitales, y usar esta información para pronosticar la irradiación futura. Por ejemplo, un método sencillo consiste en estimar  $k$  a partir de imágenes satelitales, obteniendo mapas espaciales de este parámetro, para luego predecir su evolución a partir de dos o más mapas.

Otro método que puede ser de interés, en especial para plantas solares con una gran capacidad instalada, es el uso de cámaras de cielo en el sitio de la planta. Estas permiten predicciones de la irradiación en horizontes muy cercanos al tiempo real, del orden de 30 segundos a unos pocos minutos, pues permiten seguir las nubes que directamente afectan la producción de la planta. Los pronósticos se hacen de una forma similar a como se hace el pronóstico basado en las imágenes satelitales.

Finalmente, para horizontes del orden de varias horas a días, los mejores pronósticos se basan, como se mencionó, en los modelos meteorológicos globales y en modelos meteorológicos regionales que representan mejor los fenómenos meteorológicos locales. Entre estos últimos también se han desarrollado modelos enfocados a la industria solar, como WRF-solar, que implementan algoritmos más precisos para la modelación de la irradiación. En cualquier caso, y como se mencionó anteriormente, el resultado de estos modelos debe calibrarse con las observaciones que se tienen en el lugar de la planta.

La Figura 4 resume las metodologías e información meteorológica que se usa en los pronósticos de generación solar dependiendo del horizonte de interés. Ésta está basada en lo que se reporta actualmente en la literatura y muestra los procesos de la operación de XM donde estas metodologías e información meteorológica serán de utilidad.

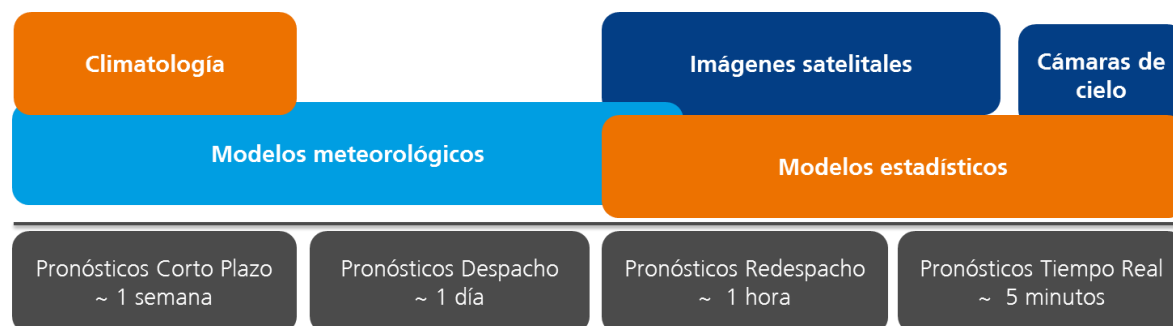


Figura 4. Metodologías e información meteorológica que se usa en los pronósticos de generación solar.

## Particularidades de la predicción de la generación eléctrica de plantas eólicas

La generación eléctrica de las plantas eólicas depende principalmente del viento que es experimentado por los aerogeneradores. En general, la potencia que entregan los aerogeneradores es proporcional a la velocidad:

$$P \propto \frac{1}{2} \rho v^3$$

Donde  $P$  es la potencia del parque eólico,  $\rho$  es la densidad del aire, que depende de su temperatura, humedad y presión, y  $v$  es la velocidad del viento. Asumiendo una densidad constante, es posible usar solo la velocidad del viento para obtener estimaciones de la potencia que se esperaría de un parque eólico ante unas condiciones de viento dadas, pues para cada aerogenerador los fabricantes suministran la relación que se espera entre  $P$  y  $v$  en condiciones ideales de operación. Los fabricantes además suministran las velocidades mínimas y máximas de operación de las plantas.

Sin embargo, estas curvas solo son indicativas y, como se dijo, en el sitio del proyecto dependerán de muchos otros factores como la dirección del viento, la topografía del sitio de la planta, la estabilidad de la atmósfera, y la turbulencia del aire, entre otros. Por lo anterior, es común utilizar curvas empíricas que se construyen para cada planta, tal como la que se muestra en la Figura 5, y una vez se cuenta con esta curva se pronostica la generación del parque al pronosticar primero el recurso y después convertirlo a potencia (Figura 2).

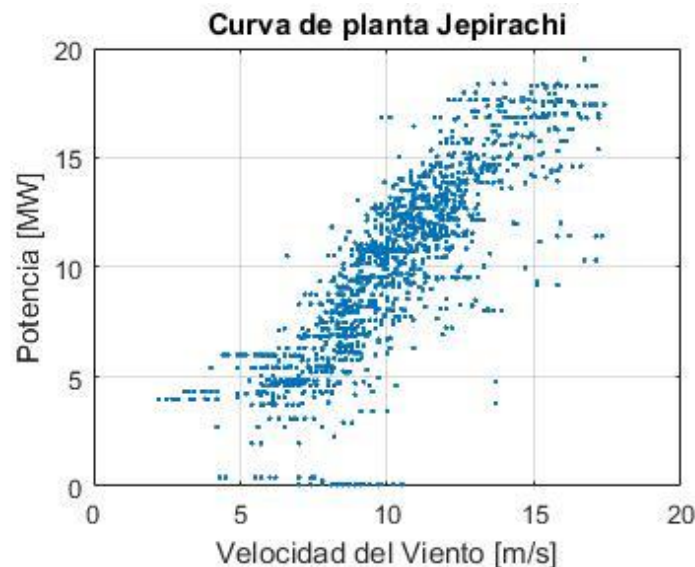


Figura 5. Curva típica de potencia empírica para Jepirachi. Esta curva se realizó con los datos que se tenían disponibles, pero podría mejorarse con base en información de mejor calidad.

Por otra parte, los pronósticos del recurso eólico se obtienen mayormente a través de modelos meteorológicos numéricos como los discutidos anteriormente. El enfoque actual es el de buscar

modelos con la mejor resolución espacial y temporal posible para las regiones donde se tiene mayor integración de energías renovables. Modelos como el Weather Research and Forecasting model (WRF) pueden descargarse y usarse para estos propósitos gratuitamente. Sin embargo, para correr estos modelos se requiere un alto poder de cómputo, además de acceso oportuno a información meteorológica de la región, lo que incrementa los costos de tener sistemas operativos que corran estos modelos constantemente.

La Figura 6 resume las metodologías e información meteorológica que se usa en los pronósticos de generación eólica dependiendo del horizonte de interés. Ésta está basada en lo que se reporta actualmente en la literatura y muestra los procesos de la operación de XM donde estas metodologías e información meteorológica serán de utilidad.



Figura 6. Metodologías e información meteorológica que se usa en los pronósticos de generación eólica.

## Predicción de la generación eléctrica de pequeñas centrales hidroeléctricas

La generación de las pequeñas centrales hidroeléctricas depende principalmente del caudal que turbinan por sus centrales y la cabeza de presión que experimentan. En específico, la potencia está dada por

$$P \propto \rho g H Q$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $g$  la constante gravitacional,  $H$  la cabeza de presión de la central, y  $Q$  el caudal turbinado. Para pronosticar la generación de las PCHs es entonces necesario pronosticar tanto  $H$  como  $Q$ . En la mayoría de los casos, y en especial en las PCHs a filo de agua,  $H$  es relativamente constante, por lo que la mayor incertidumbre recae en  $Q$ .

Para predecir  $Q$  primero es necesario contar con modelos que estimen el caudal que pasa por los ríos. Para esto se pueden usar modelos simples de lluvia-caudal, pero también existen modelos hidrológicos mucho más complejos que se podrían considerar, tales como los modelos hidrológicos distribuidos. En ambos casos las estimaciones de la lluvia podrían obtenerse de sistemas de monitoreo remoto, tales como imágenes satelitales o radares, o de estaciones meteorológicas en la cuenca de proyecto y, para pronósticos con horizontes de tiempo mayores, de modelos meteorológicos.

Un reto que se tiene respecto a estos pronósticos es que no se tiene mucha experiencia internacional con estos, y es difícil encontrar proveedores que ofrezcan el servicio de pronosticar la generación de las PCHs. Por lo tanto, es de esperar que los pronósticos que utilice XM de estos provengan de desarrollos internos con apoyo de entidades colombianas externas. La Figura 7 resume las metodologías que se prevé podrán usarse dependiendo del horizonte de interés para los pronósticos del CND.

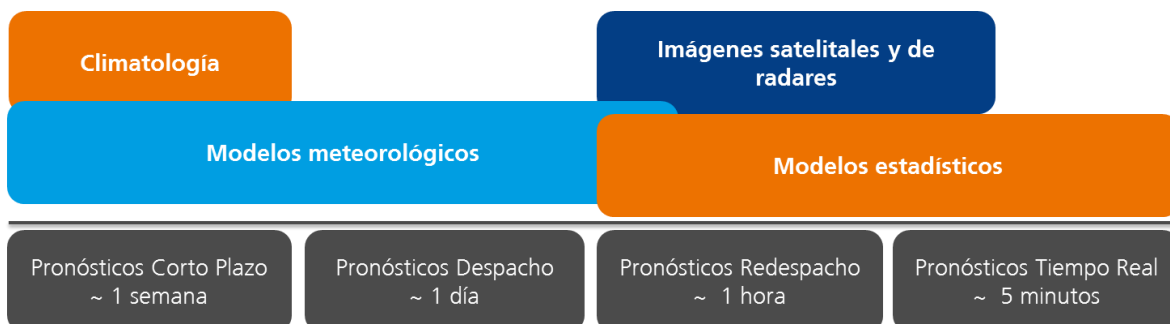


Figura 7. Metodologías e información meteorológica que podrá ser de utilidad en los pronósticos de generación de las PCHs.

