

## RESUMEN DE ESTUDIO BID

# La red del futuro – desarrollo de una red eléctrica limpia y sostenible para América Latina

Catherine Montiel: [cathe2691@gmail.com](mailto:cathe2691@gmail.com)

### Datos clave y contexto

#### Emisiones y cambio climático

Alrededor del 80% de la energía que se genera a nivel mundial se produce mediante la combustión del gas natural, petróleo y carbón. Estas han sido las principales fuentes de las emisiones de carbono en los últimos 50 años. Desde la década de 1980 la temperatura de la superficie del planeta ha sido más alta que el promedio en el siglo pasado. Por cada grado adicional de temperatura la atmósfera almacena 7% más de vapor de agua, es por esto que se presentan repercusiones en los fenómenos meteorológicos.

#### Capacidad solar y eólica instalada

El uso de combustibles fósiles se ha reducido con la utilización de fuentes renovables para producir energía. A finales del 2017, la capacidad total instalada en la región fue de 3.700 MW, lo que representa el 0.9% de la capacidad total instalada para generación eléctrica. Chile juega un papel protagónico en la instalación de nuevas plantas de energía solar, alcanzando una participación del 55.8% en la capacidad solar total instalada en toda América Latina.

La capacidad total instalada eólica en la región a finales del 2017 es de 19.720 MW, lo que representa el 5% de la capacidad total de generación de energía. En este caso, Brasil es

un jugador importante con una participación del 58.4% en la capacidad eólica total instalada en toda América Latina y el Caribe.

A pesar de que su contribución a la matriz eléctrica de América Latina su participación por el momento es marginal, aunque las fuentes de energía renovable se han vuelto cada vez más importantes para la producción de electricidad en la región.

La región de América Latina y el Caribe también muestra amplias oportunidades para aprovechar la complementariedad energética dentro de la región misma. Por ejemplo, mientras existe en Brasil un fuerte potencial para la producción de energía eólica durante las horas nocturnas, otros países como Bolivia, Perú o Chile muestran un fuerte potencial para el uso de la energía solar durante el día. Esto representa un alto potencial para lograr mayor integración del mercado eléctrico.

#### Energía primaria y matriz energética

Los países de la región han aumentado el uso de fuentes renovables, sin embargo, la mayoría de la energía generada, incluyendo otros usos como transporte e industria, proviene de combustibles fósiles (más de un 75%).

## Metodología y Supuestos

El enfoque de modelado se denomina “fundamental”, y pretenden determinar escenarios de inversión futura para América Latina continental minimizando el valor presente neto del costo de inversión y operación de todo el sistema eléctrico. Este se obtiene a partir de la solución óptima de una co-optimización a largo plazo de la generación y transmisión, formulada como un problema de optimización mixto-entero de gran escala. El modelo resultante contiene más de 5.000 plantas generadoras, más de 200 líneas de transmisión y cubre un período de 17 años.

El término "expansión de la capacidad" se refiere al problema de encontrar la combinación óptima de generación y transmisión; nuevas construcciones y retiros de plantas, que minimicen el valor presente neto de los costos totales del sistema en análisis.

### Pasos para el ejercicio de la optimización en la expansión de capacidad

#### 1. Creación de la Base de Datos

Se inició con una recopilación intensiva de datos, etapa que fue seguida por un proceso de validación en cada país. Este proceso consistió en replicar la operación de cada sistema eléctrico existente local.

#### 2. Definición de Datos de Entrada

Los tres insumos más importantes son la oferta de generación eléctrica (productores de energía), la demanda y la red de transmisión. Estas entradas representan los principales elementos del sistema de potencia en tres categorías diferentes: sistema de energía existente, capacidades de generación y transmisión planificadas (actualmente en construcción o que entrarán en operación en un futuro cercano) y candidatos para expansión (planes del sistema a largo plazo).

#### 3. Modelado de plantas de generación existentes y planificadas

El modelado de los componentes planificados sigue las mismas pautas que los componentes del sistema de potencia existentes. La principal diferencia es la fecha de puesta en marcha de la instalación.

#### 4. Modelado de plantas candidatas de generación eléctrica

Para los proyectos "candidatos" de generación y transmisión, el costo de inversión (también llamado costo de construcción o costo de capital) debe definirse para calcular los costos de capital anualizados. Los pagos de los costos de inversión se pueden definir a partir de la fecha de inicio del proyecto o un par de años antes de la fecha de inicio de operación. Los costos de capital son diferentes según la tecnología, el tamaño y la ubicación. Los candidatos serán construidos por el modelo si la decisión minimiza el costo total.

#### 5. Modelado de proyectos candidatos de transmisión eléctrica

La expansión de la transmisión óptima se refiere a la adición o eliminación de líneas de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC) del sistema, cambiando la topología de transmisión existente y refuerzo de los corredores de transmisión existentes.

#### 6. Modelado de restricciones de seguridad y operación

Se toman en cuenta las siguientes restricciones: requisitos de reserva rodante y

no rodante, límites de despacho, mínima generación/despacho de grupo no económico, mínimo flujo hidráulico, limitaciones de combustible, flujos de interconexión fijos y contratos bilaterales, límites de transmisión especiales.

### Estimación de la demanda

Según las proyecciones, la demanda total de energía para América Latina continental aumentará de aproximadamente 1.500 TWh en 2016 a más de 2.500 TWh en 2030.

La tasa de crecimiento promedio de la demanda de América Latina continental en su conjunto se estima en un 3.67% anual.

### Precios futuros de los combustibles

Las proyecciones para precio de combustibles se basaron en proyecciones genéricas de precios de referencias reconocidas a nivel internacional. Además, las estimaciones locales por país y por tipo de combustible se calculan multiplicando esta referencia por un factor local de ajuste.

### Evolución de costos de capital

Hay una tendencia significativa hacia la disminución de los costos de capital para las tecnologías de generación no convencionales (fotovoltaica, eólica, biomasa, marinas). En general, estas tecnologías muestran un declive pronunciado en los primeros años del estudio, seguido de una disminución menos pronunciada.

### Costos de capital

De forma similar a las tendencias de los pronósticos locales del precio de los combustibles, los factores de ajuste regional se utilizan para "ajustar" los costos de capital de estas tecnologías y obtener una mejor estimación de las condiciones locales para estas inversiones en cada país.

### Potencial de energía renovable

Mediante un proceso sistemático se identifica el área potencial disponible para el desarrollo de proyecto eólicos y solares después de la aplicación de múltiples filtros de uso de tierra. Las áreas de alto recurso, definidas como aquellas que superan un factor de planta bruto de 35% para energía eólica y una radiación solar global horizontal de más de 175 W/m<sup>2</sup> para emplazamientos solares, proporcionan el potencial para ubicar posibles proyectos candidatos con una variedad de tamaños de planta e interconexión a cada nodo de transmisión en el modelo. Finalmente, los candidatos de proyectos eólicos y solares están caracterizados con la capacidad y el factor de planta bruto determinados por zona y por país para la optimización de la planificación a largo plazo.

### Caracterización de la energía renovable variable

El modelo de Investigación y Predicción Meteorológica (WRF, por sus siglas en inglés) se usó para simular variables atmosféricas desde 2000-2014 y producir series de tiempo de generación de energía eólica y solar. Estos datos, junto con los supuestos de las tecnologías de generación de energía eólica y solar, se utilizan para sintetizar una serie temporal histórica de quince años de perfiles de potencia por hora para cada zona de alto potencial e intervalo de recursos.

Por otro lado, en cuanto a la disponibilidad de la energía hidroeléctrica, la metodología utilizada para crear diversidad de afluencias naturales en el proceso de simulación sigue una metodología estado del arte para estimar los parámetros estadísticos de un proceso estocástico autorregresivo espacialmente

correlacionado a partir del análisis de los flujos naturales históricos.

### Planificación de la generación

La instalación máxima por generación está limitada por: potencial total de la tecnología y límites anuales (consideran características del mercado local por tecnología y escenario).

### Supuestos de transmisión

El sistema de transmisión está representado por nodos primarios para cada país, la configuración de la red, las áreas de intercambio de energía existentes y la posibilidad de refuerzo de transmisión.

Para cada país se tienen tres tipos de conexiones internas: líneas existentes (operativas), proyectos planificados y proyectos candidatos (se incluyen los proyectos existentes que, en escenarios de mayor generación, tengan oportunidad de expandirse).

Se consideran también los niveles de voltaje a los cuales se podrían ejecutar refuerzos. Debe tomarse en cuenta que algunas líneas de interconexión existentes no están operando actualmente a la capacidad diseñada, como la línea entre México y Guatemala.

## Resultados y Escenarios

Los resultados muestran que es posible lograr una participación de energía renovable (hidroeléctrica, solar, eólica, biomasa y geotérmica) del 80% para todo el continente, y a un menor costo de operación e inversión, en comparación con la tendencia actual. Otro punto importante es resaltar el beneficio de mayores niveles de interconexión entre países, incrementos pequeños en las inversiones permiten alcanzar niveles más eficientes de energía renovable.

Los resultados también indican que la óptima inversión, considerando restricciones e independencia energética de cada país, apunta hacia una América Latina totalmente interconectada.

### Escenarios

**BASE:** baja penetración de energía renovable y baja integración de transmisión internacional  
Este escenario considera una trayectoria “tradicional” para satisfacer la demanda proyectada. Se orienta respecto a los planes de expansión y generación de los países. No comprende integración regional adicional.

**RE+:** alta penetración de energía renovable y baja integración de transmisión internacional  
Se incorporan de manera óptima candidatos renovables (80% de participación en 2030), se mantienen las interconexiones existentes en el escenario BASE.

**RE+CO:** alta penetración de energía renovable y alta integración de transmisión internacional  
Incorpora de manera óptima generación renovable (mínimo 80% al 2030) y alto grado de interconexión entre países (todas las líneas que permitan alto grado de integración renovable).

### Expansión de la capacidad óptima

Para el escenario base los recursos seleccionados en el proceso de optimización de la expansión de la capacidad, en su mayoría, corresponden a recursos solares y eólicos. Se observa una disminución gradual de la generación térmica. La energía hidroeléctrica, que actualmente domina la generación

eléctrica en casi toda la región, también disminuye su capacidad, aunque se mantiene en los próximos 15 años como el principal contribuyente a la capacidad de generación de energía.

En el escenario RE+, la incorporación de al menos 80% de energía renovable al 2030, reduce la instalación de centrales térmicas de gas natural (se sustituye con energía solar y eólica).

En el escenario RE+CO se tiene la misma meta de penetración renovable, pero se construyen menos plantas de generación, esto se explica con el aumento de la capacidad de las interconexiones entre países. La mejora en transmisión impulsa una mayor eficiencia en el aprovechamiento de los recursos solares y eólicos.

### Generación eléctrica

En el escenario BASE la participación de energía renovable crece de 64.3% en 2016 a 70.8% en 2030, la energía solar y eólica aumenta de 5.1% a 18.9%. Por otro lado, en el escenario RE+ la generación térmica se reduce 9%, lo reemplaza principalmente energía eólica que pasa del 4.3% al 18.3% de la generación total. En el escenario RE+CO se reduce la cantidad de capacidad instalada de fuentes renovables respecto a RE+, pero la generación de energía se mantiene prácticamente igual.

### Evolución de la nueva capacidad

En el escenario BASE, en el caso de Centroamérica, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras y Panamá alcanzan sus respectivos límites asumidos de construcción anuales para los recursos solares. Esta situación se presenta a la inversa en Suramérica, donde no se alcanzan los límites.

En el escenario RE+, los resultados de la simulación para Brasil y México también muestran un enorme crecimiento en la instalación de nueva capacidad solar. Brasil construye casi once veces más capacidad solar que en el escenario BASE.

En el escenario RE+CO se instala más energía solar que el escenario BASE y algo menos que el escenario RE+. En general, la instalación de plantas solares se acerca a los límites de expansión de capacidad anuales respectivos. En el escenario altamente interconectado, se ha construido un 132% más de capacidad solar que en el Escenario BASE.

En el escenario RE+ Brasil y México muestran el mayor crecimiento total (óptimo) de la capacidad eólica en el modelo con un aumento combinado del 47% sobre el escenario BASE. México casi cuadruplica su capacidad eólica en comparación con el escenario BASE, mientras que Brasil disminuye un 6%. La mayoría de los países en realidad construyen menos capacidad eólica en el modelo de escenario RE+CO que en el escenario BASE.

### Costos totales del sistema eléctrico

La diferencia de tecnologías de generación entre el escenario BASE y el escenario RE+ explica los cambios en la estructura de costos del sistema eléctrico en América Latina. Hay una reducción notable en el componente de costo de combustible entre estos dos escenarios, explicado por la menor participación de electricidad de plantas de energía térmica con combustibles fósiles, mientras que para la mayor capacidad renovable en el escenario RE+ el costo del combustible es cero. El componente costo de inversión aumenta desde el escenario BASE a RE+, siendo una

consecuencia directa del gran crecimiento en la capacidad de las tecnologías renovables y la generación total.

Mientras tanto en el escenario RE+CO se tienen costos operativos similares al escenario RE+, pero los costos de inversión son notablemente más bajos. El escenario RE+CO reemplaza la inversión en capacidad renovable con inversión de transmisión respecto al escenario RE+.

Costo total del sistema eléctrico (Billones de USD)



### Beneficios de la integración: Evolución de las emisiones

En cuanto a los gases contaminantes como los óxidos de azufre (SOx) y de nitrógeno (NOx), se tiene una emisión de 15.7 millones de toneladas en el escenario BASE, mientras que para el RE+ y RE+CO se da una disminución del 7.2% y 9.6% respectivamente. Resultados similares se obtienen con el dióxido de Carbono, se emiten 4.7 Gton en el escenario BASE y en el RE+ y RE+CO disminuye un 12.5% y 14.7% respectivamente.

### Resultados Nacionales

Los principales resultados nacionales en conjunto con otros índices se muestran en la siguiente tabla:

País	Población (millones)	Capacidad instalada (2016)	ERNC en el escenario RE+CO	Costo (billones de USD)		Emisiones (toneladas métricas de dióxido de carbono)	
				BASE	RE+CO	BASE	RE+CO
Costa Rica	4,8	3,467	23,80%	4	4,3	0,85	-0,1
El Salvador	6,1	1,676	39,90%	4,7	4	1,63	0
Guatemala	16,3	4,205	22,70%	9,2	8,6	2,97	0,6
Honduras	8	2,439	23,10%	4	3,4	2,19	0,2
Nicaragua	6	1,396	43,50%	3,7	3,3	1,51	0
Panamá	3,9	3,386	6,60%	5,7	5,3	2,91	-0,7

## Conclusiones del estudio BID – La red del Futuro

- Es posible alcanzar la meta de participación de energía renovable del 80% para el 2030 mediante diferentes escenarios.
- Aún en el escenario BASE la participación de energía renovable variable aumenta 4 veces durante el periodo 2016-2030.
- En un escenario RE+CO se consiguen reducciones importantes de gases contaminantes y dióxido de carbono.
- La integración regional eléctrica facilita el flujo de potencia de bajas emisiones de carbono.
- El escenario RE+CO construye de manera óptima más capacidad de transmisión internacional, mejorando la eficiencia del sistema por lo que se requiere menor capacidad instalada para alcanzar la meta del 80% de energía renovable al 2030.
- En el escenario BASE se alcanza el 70.8% de producción renovable al 2030, por lo que, a pesar de ser un escenario conservador, la capacidad solar y eólica aumentarán casi 4 veces al 2030.
- Los costos totales de los desarrollos ya planificados significan \$872.81 billones, mientras que el escenario RE+ son \$865.9 billones y en el RE+CO \$852.52 billones. Lo cual justifica la orientación hacia energías renovables no convencionales y mejoras en las conexiones de transmisión internacionales.