



Estado Plurinacional de Bolivia
Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas
Dirección General de Energías Alternativas



Imagen: Archivo GIZ/ CNDC

Informe de diagnóstico: Pronóstico de Generación Eólico y Solar en Bolivia

Gestión 2017

MINISTERIO DE
ENERGÍAS

PROGRAMA DE ASISTENCIA TÉCNICA DE LA COOPERACIÓN ALEMANA AL DESARROLLO

La Cooperación Alemana al Desarrollo a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y su Programa de Energías Renovables (PEERR) tiene como objetivo brindar asistencia técnica a través del Ministerio de Energías (MEN) a las entidades del sector eléctrico en el área técnica, normativa y formación de capacidades para el desarrollo de las Energías Renovables (EERR) y Eficiencia Energética (EE).

En este contexto, la información contenida en este documento es de carácter referencial y no representa necesariamente la política institucional del Ministerio de Energías ni de las entidades del sector eléctrico.



Implementada por:





Estado Plurinacional de Bolivia
Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas
Dirección General de Energías Alternativas



Imagen: Archivo GIZ/ CNDC

Informe de diagnóstico: Pronóstico de Generación Eólica y Solar en Bolivia

Gestión 2017

MINISTERIO DE
ENERGÍAS

Ministro de Energías

Rafael Alarcón Orihuela

Viceministro de Electricidad y Energías Alternativas

José Bismar Canelas Revollo

Director General de Energías Alternativas

Raúl Gregorio Villarroel Barrientos

Responsable Técnico

Rudy Roberto Mamani Quisbert



Implementada por:



La Paz – Bolivia
2017

ÍNDICE

1	ALCANCE E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO DE PRONÓSTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES VARIABLES	1
2	DOCUMENTACIÓN DE LA CAPACITACIÓN	4
2.1	Agenda llevada a cabo durante la capacitación con las instituciones el 15 y 16 de noviembre del 2017	4
2.2	Participantes de la capacitación para instituciones interesadas	4
2.3	Ejercicios de pronóstico.....	5
2.4	Conclusiones y recomendaciones finales de la capacitación.....	6
2.4.1	Modelo de predicción meteorológica en Bolivia para el pronóstico de la generación de electricidad por medio de energías renovables6	
2.4.2	Panorama general de los proyectos existentes y planeados en Bolivia con respecto a las energías renovables.....	8
2.4.3	Ejemplos específicos de pronósticos: Parques eólicos Qollpana I y II. 10	
3	RECOMENDACIONES EN ESPECÍFICO PARA MEJORAR EL PROCESO Y LA EXACTITUD DE LOS PRONÓSTICOS	15
3.1	Primera etapa de las medidas de mejora para pronósticos con respecto a los parques eólicos Qollpana I, II y al parque FV Yunchará	15
3.2	Segunda etapa de las medidas de mejora del pronóstico con respecto al establecimiento de pronósticos para el suministro de energía eólica y fotovoltaica en todo Bolivia	16
4	RECOMENDACIONES GENERALES PARA INTEGRAR ENERGÍAS RENOVABLES 18	
5	ADJUNTOS	21
5.1	Ejercicios de la capacitación	21
5.2	Lista de presentaciones de la capacitación.....	22
5.3	Información de contacto del facilitador de la capacitación.....	23

1 ALCANCE E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO DE PRONÓSTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES VARIABLES

De acuerdo con los Términos de Referencia de la GIZ, el objetivo del proyecto sobre el pronóstico de energías renovables variables fue el intercambio de experiencias sobre predicciones del suministro por energías renovables variables y la elaboración de recomendaciones relacionadas con las energías renovables variables (ERV) para la implementación de mejoras en la operación del CNDC del Sistema Interconectado Nacional de Bolivia. Los servicios fueron provistos por Elia Grid International GmbH (EGI). Para este proyecto de consultoría en específico, la competencia en pronósticos combinados de ERV con experiencia regional fue provista específicamente por nuestro socio del Grupo ELIA, GridLab GmbH (GRIDLAB) por medio de acuerdos internos del Grupo.

En el contexto del esquema de predicción del suministro por ERV, este proyecto incluyó la preparación y coordinación del contenido, así como la participación como expositor en reuniones de coordinación con partes interesadas en el sector eléctrico, una capacitación de dos días sobre el intercambio de experiencias, evaluación posterior a dicha capacitación y documentación de conclusiones y recomendaciones. Las presentaciones fueron realizadas en inglés con apoyo de traductores.

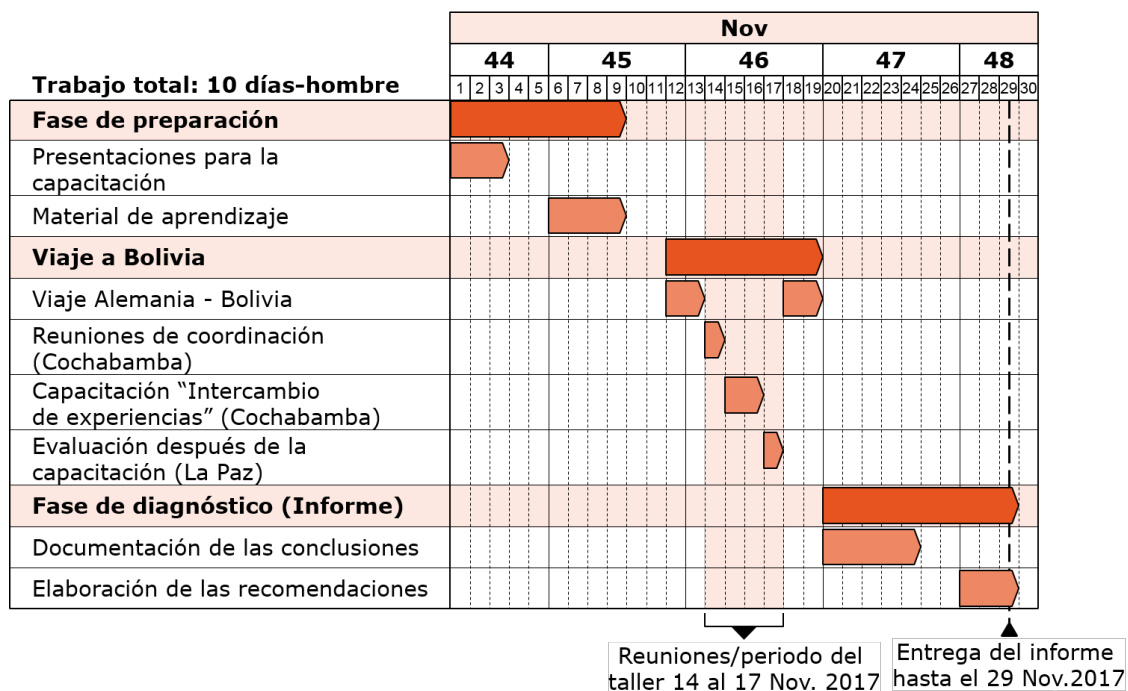
A continuación, se listan los servicios prestados a detalle:

- Preparación de las presentaciones para la capacitación en inglés, además de las presentaciones entregadas a los participantes como material de apoyo en español.
- Preparación del material de enseñanza para los participantes de la capacitación en español.
- Realización de reuniones de coordinación con partes interesadas en el sector eléctrico boliviano en inglés, entre otros participantes el CNDC (en Cochabamba).
- Realización de la capacitación sobre “intercambio de experiencias” con participantes técnicos del sector eléctrico en inglés pero basado en las presentaciones de apoyo y el material de enseñanza distribuido en español (llevada a cabo en Cochabamba, Bolivia), de acuerdo con los Términos de Referencia considerando:
 - Presentación de experiencias en la implementación de pronósticos operativos en sistemas eólicos y fotovoltaicos en otros operadores de red a nivel regional e internacional,
 - Explicación de las metodologías recomendadas internacionalmente para pronósticos operativos,

- Explicación de las condiciones mínimas necesarias para ser capaces de operar en una red integrada adecuadamente con base en predicciones meteorológicas y despacho de carga,
- Fungir como moderador en el debate con las instituciones del sector eléctrico.
- Efectuar la evaluación posterior a la capacitación en inglés (La Paz, Bolivia).
- Elaboración del informe de diagnóstico incluir la memoria-informe y resultados de la capacitación en español, también incluye la reflexión sobre la identificación de fortalezas, oportunidades, requerimientos y recomendaciones para la implementación de un sistema de pronóstico operativo en Bolivia vinculado a las energías renovables.

Los servicios fueron realizados de acuerdo con la planeación en el diagrama de Gantt presentada a continuación:

Gráfico 1: Diagrama de Gantt del proyecto según su realización



Fuente: EGI/GridLab

La capacitación fue llevada a cabo por el Dr.Ing. Matthias Müller-Mienack quien funge como Director del Departamento de Investigaciones y Estudios de GridLab GmbH y como Experto Internacional Senior en términos de planeación y operación del sistema. El obtuvo amplia experiencia especialmente a lo largo de los siguientes pasos en su carrera profesional: Después de su graduación en 2004, él trabajó como Asistente de Investigación hasta 2005 y concluyó su doctorado en Ingeniería Eléctrica en 2007 en la Universidad Tecnológica de Brandenburgo - Cottbus. A partir del 2005 hasta el 2012 él estuvo trabajando para la Transmisora 50Hertz Transmission GmbH (50Hertz) y para la anterior Vattenfall Europe Transmission GmbH (VE-T) con las siguientes responsabilidades: Planeación estratégica de la red (hasta 2006), Director de Proyecto Offshore

(2007), Director de Conceptos de Red Europeos (hasta 2010), Director del Equipo de Estrategia Corporativa (hasta 2012). Del 2009 al 2011, en paralelo a la posición en 50Hertz, fue Coordinador del grupo de trabajo "2050 Electricity Highways" de ENTSO-E y también miembro de los comités consultivos gubernamentales alemanes para sistemas eléctricos "Nuevas Tecnologías" y "Almacenamientos". Dentro del Grupo ELIA, a principios del 2013, Matthias Müller-Mienack tomó la responsabilidad de la Dirección Técnica en GridLab como "Centro Europeo de Formación e Investigación en Materia de Seguridad para Sistemas Eléctricos", brindando entrenamiento para operadores de red y seminarios para transportistas, distribuidoras y operadores de parques eólicos. En paralelo al enfoque de negocios hacia entrenamientos para operadores de red, estableció el enfoque hacia estudios y consultoría como parte integral del portafolio de GridLab. Desde comienzo del 2016, es responsable del Departamento de Investigación y Estudios en GridLab. De manera simultánea, es miembro del comité consultivo gubernamental alemán para sistemas eléctricos "Seguridad del Sistema".

2 DOCUMENTACIÓN DE LA CAPACITACIÓN

2.1 Agenda llevada a cabo durante la capacitación con las instituciones el 15 y 16 de noviembre del 2017

La agenda del taller de dos días conducida según las premisas del CNDC en Cochabamba fue la siguiente:

Día 1 (15 de noviembre del 2017)

- 09:00 – Bienvenida y panorama general sobre el desarrollo de las energías renovables en Alemania.
- 10:00 – Experiencia operativa en pronósticos para ERV a nivel regional e internacional.
- 11:00 – Pronóstico para la producción por ERV en Alemania.
- 12:00 – Almuerzo.
- 14:30 – Ejemplo del pronóstico para Qollpana I y II.
- 15:00 – Ejercicios sobre pronósticos.
- 16:00 – Discusión.
- 16:30 – Fin del día 1.

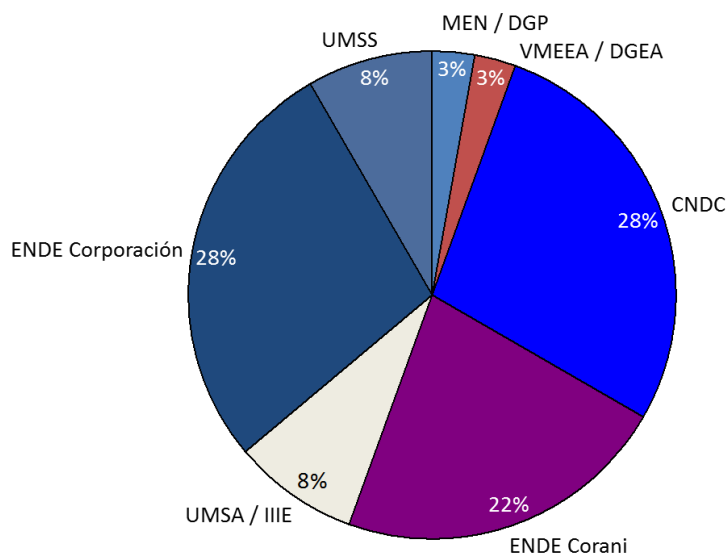
Día 2 (16 de noviembre del 2017)

- 09:00 – Recapitulación del día 1.
- 09:30 – Estimación de la producción por energías renovables.
- 11:00 – Perspectiva a futuro de las metodologías de pronóstico.
- 12:00 – Almuerzo.
- 14:30 – Lineamientos para los servicios de predicción.
- 15:30 – Recomendaciones generales para la integración de energías renovables.
- 16:00 – Resumen del taller y debate.
- 16:30 – Fin del día 2.

2.2 Participantes de la capacitación para instituciones interesadas

Además de los participantes por parte de la GIZ, 36 participantes de 8 instituciones relevantes del sector se incorporaron a la capacitación en Cochabamba. El diagrama a continuación muestra la distribución de los participantes de dichas instituciones.

Gráfico 2: Distribución de los participantes durante la capacitación para instancias interesadas en Cochabamba



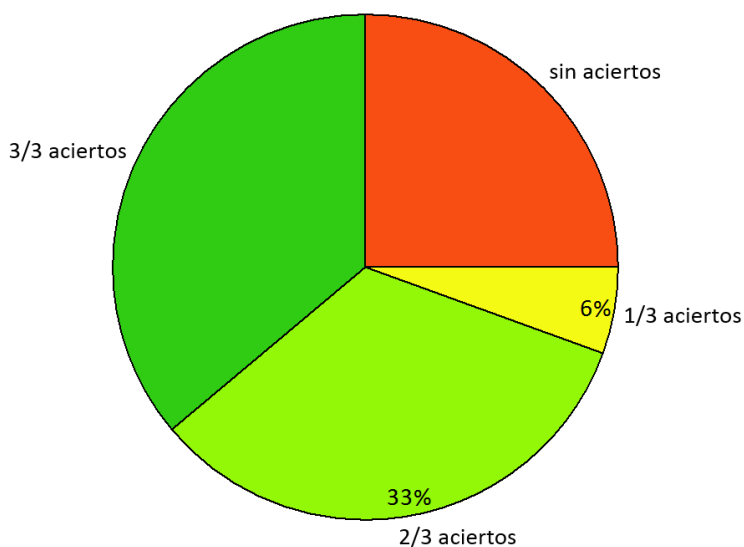
Fuente: EGI/GridLab

2.3 Ejercicios de pronóstico

Como parte de la capacitación para instituciones interesadas y después de una inmersión profunda en los métodos de cálculo de los indicadores clave de rendimiento relevantes para pronósticos, diferentes ejercicios fueron realizados por los participantes con especial énfasis en el cálculo del RMSE (Raíz del Error Cuadrático de la Media) y la Tendencia. Las actividades concretas están reflejadas en el capítulo adjunto 5.1.

El siguiente diagrama muestra los resultados alcanzados por los participantes:

Gráfico 3: Resultados de los participantes con respecto a los ejercicios de la capacitación



Fuente: EGI/GridLab

En total 22 de los 36 participantes obtuvieron un resultado positivo en al menos 2/3 de las actividades resueltas.

2.4 Conclusiones y recomendaciones finales de la capacitación

2.4.1 Modelo de predicción meteorológica en Bolivia para el pronóstico de la generación de electricidad por medio de energías renovables

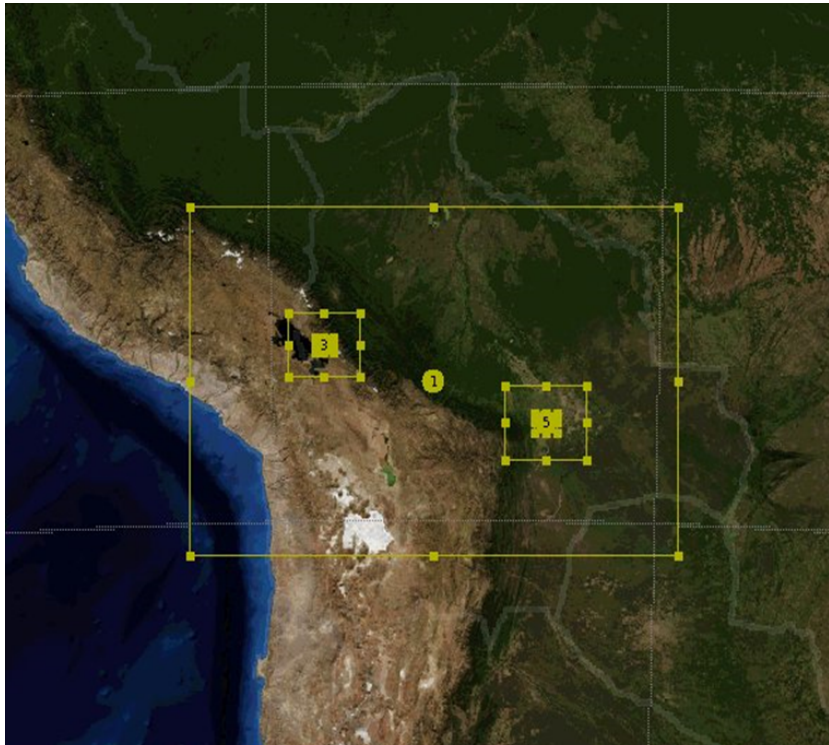
En la situación actual ENDE CORANI compra información de pronósticos (velocidad y dirección del viento) para los parques eólicos existentes Qollpana I y II de un proveedor de servicios externo. Estos datos de pronósticos son reenviados periódicamente al CNDC usados para la planeación del suministro eólico. La exactitud de este pronóstico es analizada a manera de ejemplo en el subcapítulo 2.4.3.

De manera simultánea, el Centro de Modelación y Simulación Numérica de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) desarrolla, aplica y mejora continuamente su modelo de predicción meteorológica el cual puede ser aplicado en el futuro para el pronóstico de la generación de energía por ERV (Energías Renovables Variables) en Bolivia. El modelo numérico global aplicado está basado en "Global Forecast System" (GFS, por sus siglas en inglés), el modelo más detallado para la predicción regional está basado en el Modelo de Predicción e Investigación del Clima (WRF, por sus siglas en inglés).

Para el área del parque eólico de Qollpana y Santa Cruz, un modelo aún más refinado está en proceso de elaboración por la UMSA en preparación para su aplicación en el pronóstico de velocidad del viento y generación en los parques eólicos Qollpana I y II. Además del modelo meteorológico, también es requerido por el CNDC, la conversión de información de la velocidad del viento en información de series temporales de generación (en MW), esta competencia necesita seguir siendo desarrollada en el Centro de Modelación y Simulación Numérica.

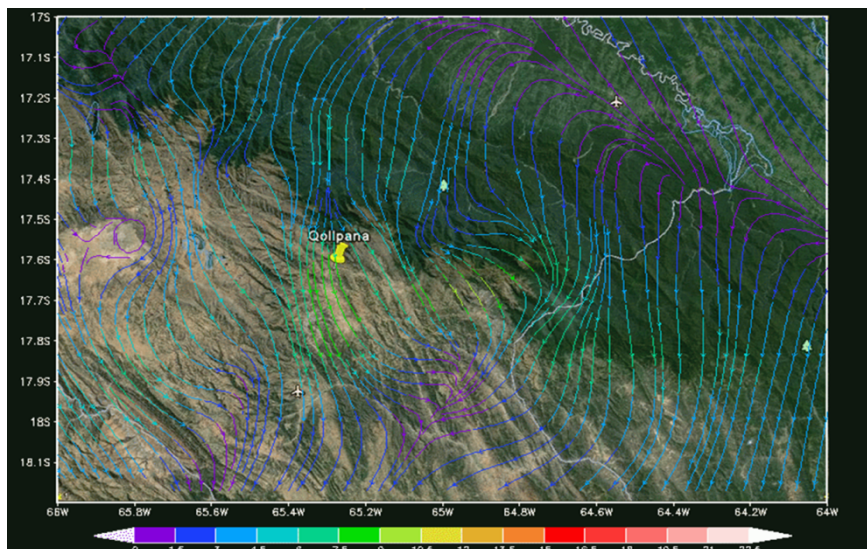
El gráfico 4 muestra el modelo refinado de predicción meteorológica en UMSA para el área del parque eólico de Qollpana con una perspectiva regional, mientras que el gráfico 5 muestra un ejemplo específico del área de modelación Qollpana.

Gráfico 4: Simulación de vientos en áreas de proyectos eólicos



Fuente: UMSA

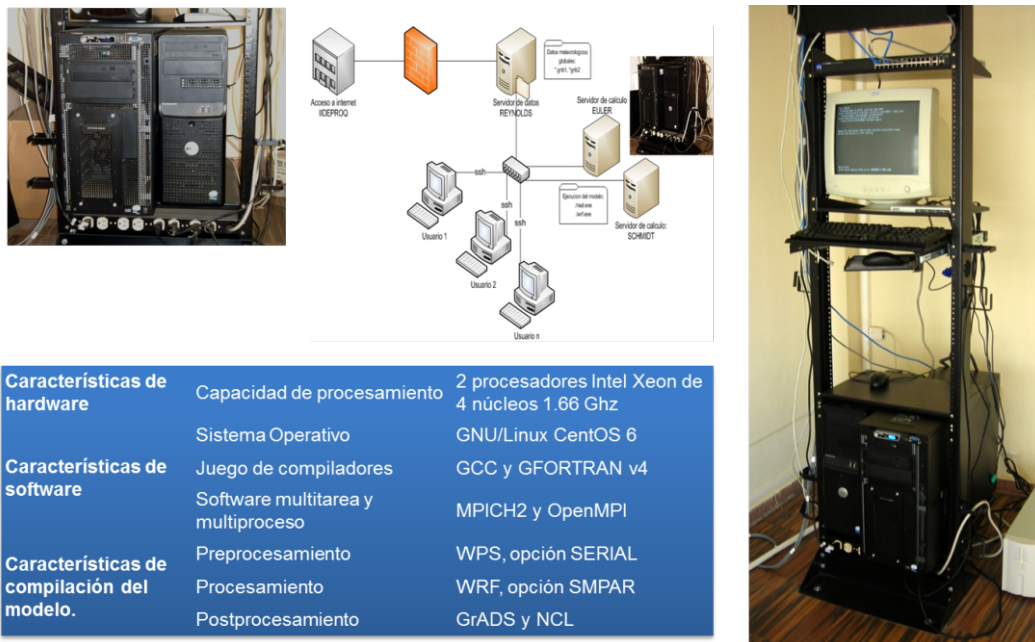
Gráfico 5: Simulación de vientos en área Qollpana (80m, 7 días, 1km)



Fuente: UMSA

Sin embargo, el sistema de cómputo (ver gráfico Gráfico 6) del Centro de Modelación y Simulación Numérica está basado en Intel Xeon 1,66 GHz con dos procesadores y 4 núcleos [Fuente: UMSA] y por lo tanto no califica como herramienta de vanguardia para este tipo de modelos numéricos complejos. Esto resulta en un bajo rendimiento del modelo de tal manera que en algunos casos los resultados de la predicción están disponibles solo después del tiempo real, los cuales no pueden ser usados para pronósticos operativos como se requiere en el CNDC.

Gráfico 6: Sistema de cómputo del Centro de Modelación y Simulación Numérica (CMSN) de la Universidad Mayor de San Andrés



Fuente: UMSA

2.4.2 Panorama general de los proyectos existentes y planeados en Bolivia con respecto a las energías renovables

Durante el debate en la capacitación, una de las principales contribuciones para el diálogo entre las partes fue la discusión sobre el estado actual de los siguientes tres parques de energías renovables (en total 32 MW) en conexión a la red eléctrica boliviana y que ya se encuentran en operación:

- Parque eólico Qollpana I: 3 MW
- Parque eólico Qollpana II: 24 MW
- Parque fotovoltaico Yunchará: 5 MW

En preparación para la capacitación con las instituciones interesadas, CNDC y ENDE CORANI facilitaron las siguientes series temporales para los tres parques de energías renovables antes mencionados:

- Parque eólico Qollpana I y II (por separado): Diferentes datos
 - Pronóstico de la potencia [MW] por hora desde 30 de octubre de 2017 hasta 5 de noviembre de 2017.
 - Observado de la potencia [MW] por hora desde 30 de octubre de 2017 hasta 5 de noviembre de 2017.
 - Curvas de velocidad del viento y potencia de los aerogeneradores GOLDWIND (Qollpana I) desde el 1 de octubre de 2017 hasta 13 de noviembre de 2017.

- Curvas de velocidad del viento y potencia de los aerogeneradores ENERCON (Qollpana II) desde 1 de octubre de 2017 hasta 13 de noviembre de 2017.
- Parque fotovoltaico Yunchará: Datos de la estación meteorológica desde 18 de agosto de 2017 hasta 17 de octubre de 2017.
 - Temperatura del ambiente.
 - Irradiación piranómetro inclinado.
 - Irradiación piranómetro horizontal.
 - Humedad relativa.
 - Temperatura de los paneles.
 - Velocidad del viento.

Además de los parques de ERV (Energías Renovables Variables) ya existentes, el Gráfico 7 muestra también los proyectos de energías renovables planeados, por el momento los próximos cinco proyectos confirmados son los siguientes:

- Parques eólicos Warnes, San Julián y El Dorado (Región Santa Cruz): en total aprox. 90 MW
- Parques FV Oruro (Región Oruro) y Uyuni (Región Potosí): en total aprox. 110 MW.

La capacidad de generación instalada por energías renovables en el 2020 está prevista en 330 MW en total.

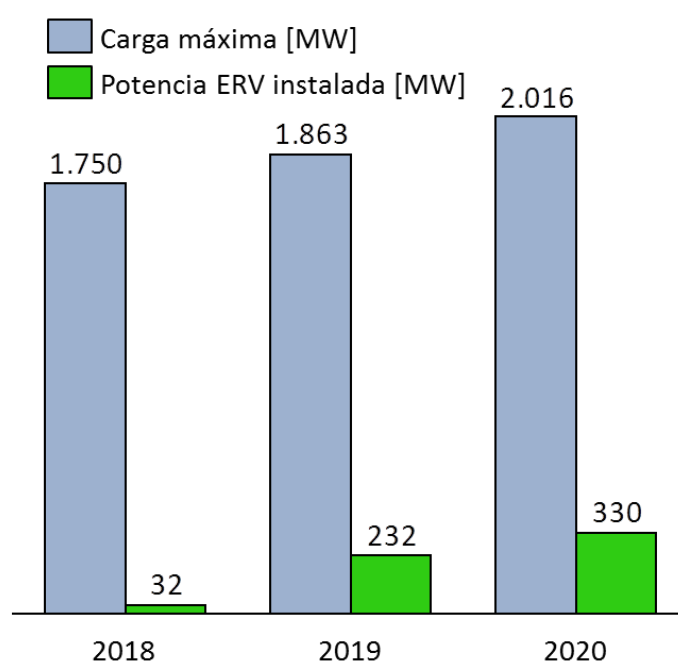
Gráfico 7: Mapa con el panorama general que incluye los proyectos de energías renovables (existentes y planificados) en Bolivia



Fuente: ENDE CORPORACIÓN

Comparado con el desarrollo de carga máxima esperada en el sistema eléctrico boliviano, el porcentaje de la capacidad de energías renovables comparada con la carga máxima incrementará de 1,8% (esperado durante el 2018) a 16,4% en 2020. Para el sistema eléctrico boliviano aislado, este porcentaje de energías renovables ya es un factor dominante; y especialmente durante situaciones de carga de menor demanda el porcentaje de ERV (Energías Renovables Variables) es mucho mayor y requiere los pronósticos más acertados posibles.

Gráfico 8: Comparación del desarrollo esperado de la carga máxima y la potencia del ERV instalada



Fuente: EGI/GridLab, Fuente de los datos: CNDC

2.4.3 Ejemplos específicos de pronósticos: Parques eólicos Qollpana I y II

Basados en la información recibida de los parques eólicos por parte de CNDC y ENDE CORANI, la predicción y las series temporales de lo observado para el 2 de noviembre del 2017 fueron seleccionados a manera de ejemplo y evaluado según la exactitud del pronóstico.

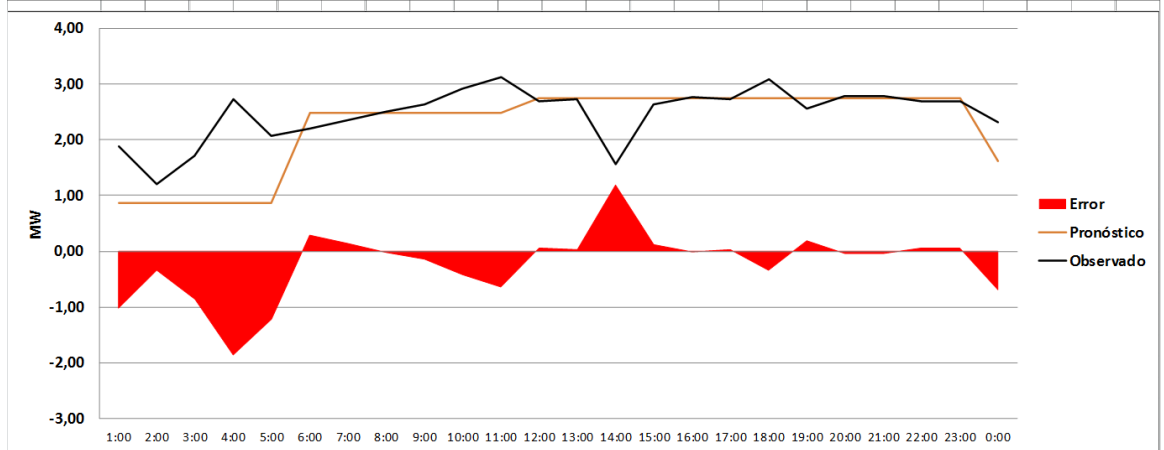
El Gráfico 9 muestra la exactitud del pronóstico de solo 21,1% para el parque eólico Qollpana I (el RMSE relacionado a la potencia eólica del área), tomando en consideración las series temporales por hora para el pronóstico y las observaciones disponibles de los operadores de red del CNDC. El Gráfico 10 muestra la exactitud del pronóstico de solo 21,3 % para el parque eólico Qollpana II.

En comparación, el grado de exactitud del pronóstico para 50 Hertz para un parque eólico en específico, como fue expuesto durante la capacitación, equivale respectivamente a 13,7 % (pronóstico día anterior 8 a.m. vs. generación cuantificada, con granularidad de cuarto de hora) y 12,1 % (pronóstico día anterior 8 a.m. vs. generación cuantificada).

En el debate fue clarificado que el CNDC recibe series de tiempo de pronóstico por hora basados en valores promedio de seis horas por las condiciones de pronóstico limitadas, debido entre otros a la gran diferencia de perfiles geográficos existentes. Por otra parte, el servidor para el cálculo del modelo meteorológico actual de la Universidad Mayor de San Andrés aún no provee el rendimiento requerido.

Gráfico 9: Estadísticas para el pronóstico de ERV del parque eólico Qollpana I (2 de noviembre de 2017)

Tiempo [hrs.]	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	
Pronóstico	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	1,62
Observado	1,88	1,20	1,72	2,72	2,08	2,20	2,35	2,51	2,63	2,91	3,13	2,69	2,72	1,56	2,63	2,76	2,72	3,09	2,56	2,79	2,79	2,69	2,69	2,31	
Error	-1,02	-0,34	-0,86	-1,86	-1,22	0,29	0,14	-0,02	-0,14	-0,42	-0,64	0,06	0,03	1,19	0,12	-0,01	0,03	-0,34	0,19	-0,04	-0,04	0,06	0,06	-0,69	

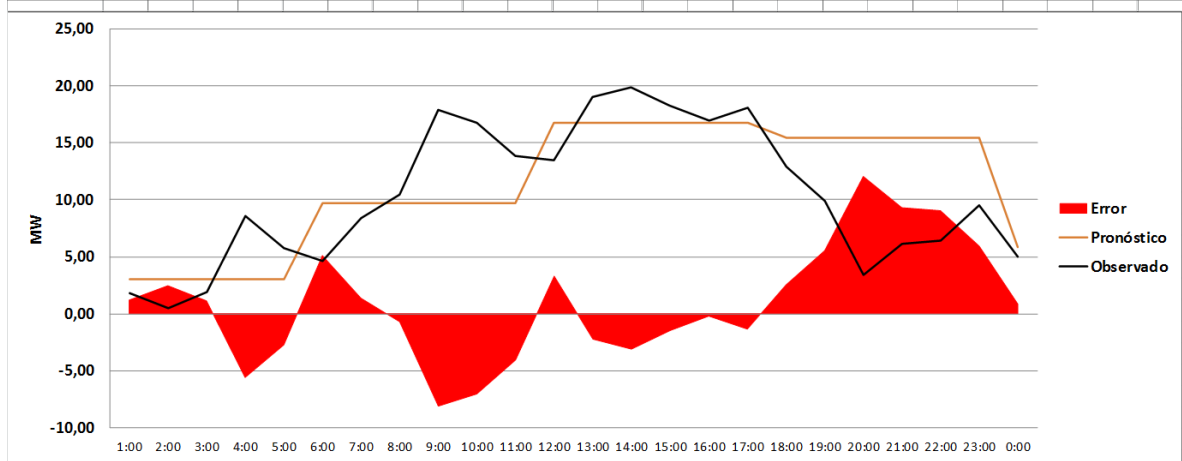


RMSE =	0,6 MW	nRMSE =	25,6%	RMSE relacionado a la potencia eólica del área (3 MW) =	21,1%
Fórmula:	$V(\sum_{i=1..n} (\text{Pron. } i - \text{Observ. } i)^2/n)$	Fórmula:	$\text{RMSE} / \emptyset (\text{Observado})$	Fórmula:	$\text{RMSE} / \text{potencia eólica instalada del área considerada}$

Fuente: EGI/GridLab, Fuente de los datos: CNDC

Gráfico 10: Estadísticas para el pronóstico de ERV del parque eólico Qollpana II (2 de noviembre de 2017)

Tiempo [hrs.]	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00
Pronóstico	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	9,75	9,75	9,75	9,75	9,75	9,75	16,77	16,77	16,77	16,77	16,77	16,77	15,48	15,48	15,48	15,48	15,48	15,48	5,84
Observado	1,79	0,53	1,86	8,59	5,74	4,63	8,38	10,45	17,85	16,78	13,81	13,46	18,99	19,87	18,24	16,97	18,11	12,93	9,93	3,42	6,17	6,43	9,53	4,98
Error	1,21	2,47	1,14	-5,59	-2,74	5,12	1,37	-0,70	-8,10	-7,03	-4,06	3,31	-2,22	-3,10	-1,47	-0,20	-1,34	2,55	5,55	12,06	9,31	9,05	5,95	0,86

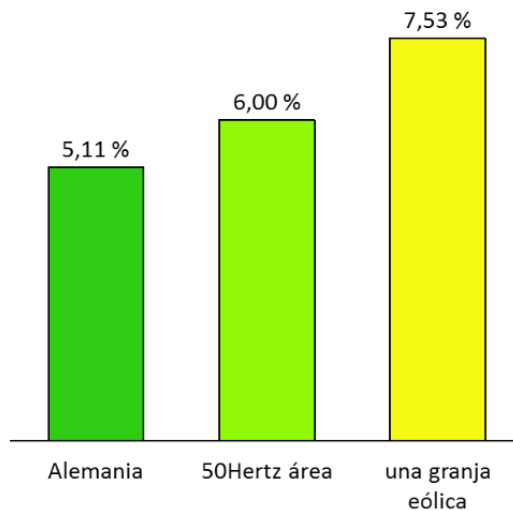


RMSE =	5,1 MW	nRMSE =	49,1%	RMSE relacionado a la potencia eólica del área (24 MW) =	21,3%
Fórmula:	$\sqrt{\sum_{i=1..n} (\text{Pron. } i - \text{Observ. } i)^2 / n}$	Fórmula:	$\text{RMSE} / \phi (\text{Observado})$	Fórmula:	$\text{RMSE} / \text{potencia eólica instalada del área considerada}$

Fuente: EGI/GridLab, Fuente de los datos: CNDC

Como un punto de atención especial, durante la capacitación fue demostrado el mejoramiento de la exactitud de un pronóstico cuando está cuenta con el efecto estadístico para el área a pronosticar, se demostró que un pronóstico combinado cuenta con mayor exactitud. El Gráfico 3 muestra la reducción del valor de RMSE (Raíz del error cuadrático de la media) para la Transportista 50 Hertz con un incremento en el área a pronosticar por ejemplo el pronóstico de generación eólica (día anterior 8 a.m. vs. estimación).

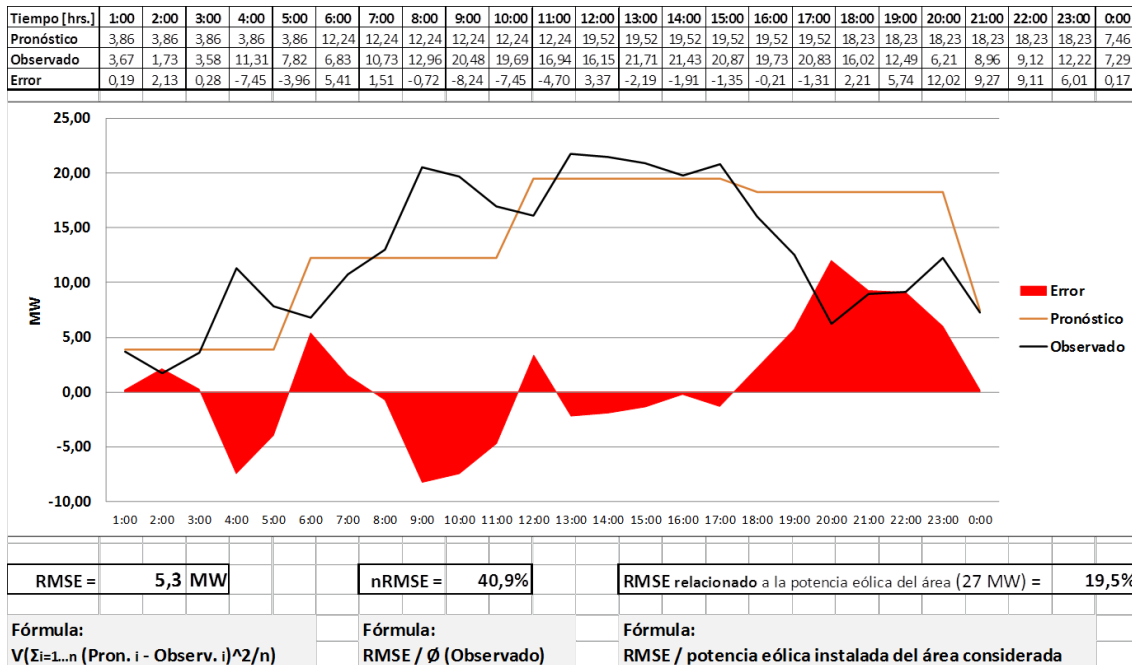
Gráfico 3: Estadísticas para el pronóstico de ERV del parque eólico Qollpana I + II (2 de noviembre de 2017)



Fuente: EGI/GridLab

Para los parques eólicos en Bolivia en específico, el Gráfico 4 muestra una exactitud mejorada del pronóstico de 19,5 % para el parque eólico Qollpana I + Qollpana II (el RMSE relacionado a la potencia eólica del área), sólo al tomar en cuenta la combinación de las series históricas por hora para el pronóstico y para lo observado.

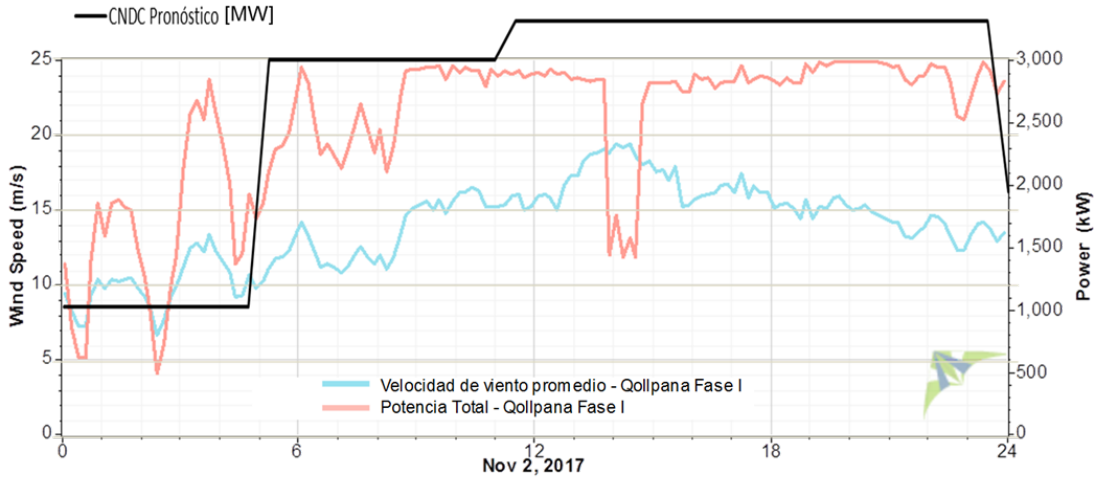
Gráfico 42: Estadísticas para el pronóstico de ERV del parque eólico Qollpana I + II (2 de noviembre de 2017)



Fuente: EGI/GridLab, Fuente de los datos: CNDC

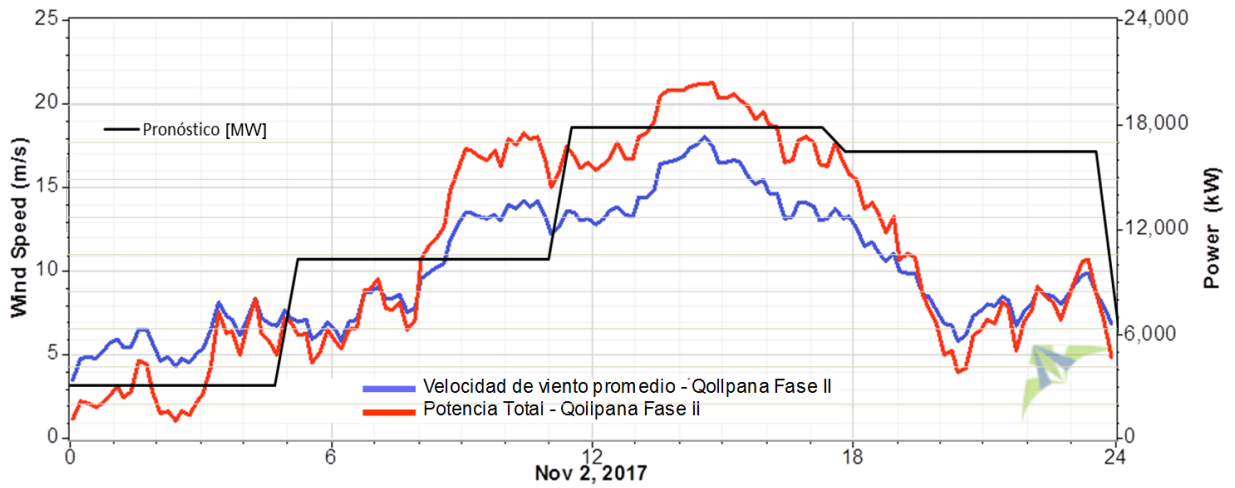
Además de la evaluación del pronóstico por hora y las series temporales observadas de Qollpana I y II, y basados en las curvas de medición del suministro según lo provisto por ENDE CONRANI, una comparación fue elaborada de manera detallada entre las series temporales por hora (basada en valores promedio por cada seis horas) y la medición del suministro en alta resolución (ver Gráfico 5 y Gráfico). Aparte de la exactitud limitada del pronóstico como ya se mencionó anteriormente, la característica de las rampas del suministro de potencia indica que series temporales de pronóstico por cuarto de hora podrían ser más razonables en lugar de series temporales por hora.

Gráfico 5: Curvas de velocidad del viento y potencia de los aerogeneradores Qollpana I (2 de noviembre de 2017)



Fuente: ENDE CORANI, CNDC

Gráfico 14: Curvas de velocidad del viento y potencia de los aerogeneradores Qollpana II (2 de noviembre de 2017)



Fuente: ENDE CORANI, CNDC

3 RECOMENDACIONES EN ESPECÍFICO PARA MEJORAR EL PROCESO Y LA EXACTITUD DE LOS PRONÓSTICOS

Después del debate dentro del marco de la capacitación de las instituciones interesadas y las sucesivas conversaciones bilaterales, las siguientes recomendaciones en concreto son abordadas en el contexto de una mejor optimización del esquema de pronóstico eólico y fotovoltaico en Bolivia.

3.1 Primera etapa de las medidas de mejora para pronósticos con respecto a los parques eólicos Qollpana I, II y al parque FV Yunchará

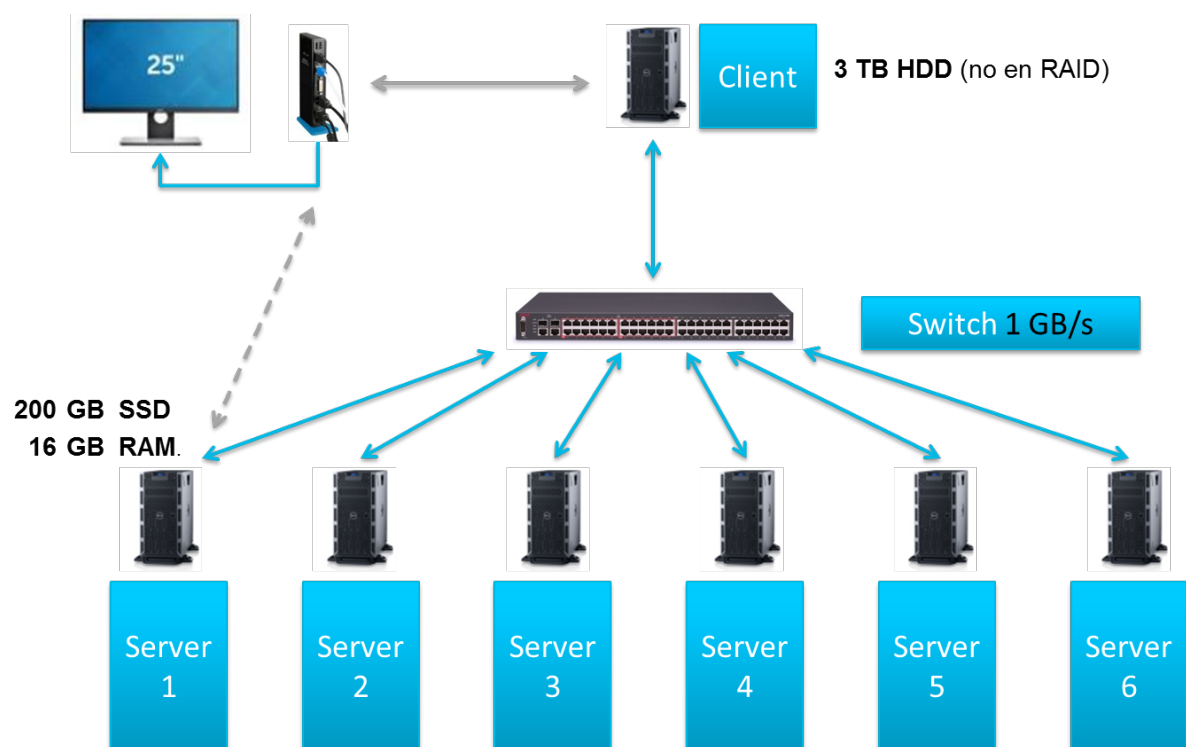
Es esta primera etapa, una optimización significativa de los pronósticos para los parques eólicos Qollpana I y II pueden ser alcanzados por ENDE CORANI y el proveedor de servicios externo contratado siguiendo las siguientes recomendaciones, además el Centro de Modelación y Simulación Numérica de la Universidad Mayor de San Andrés también puede participar como actor importante:

- Crear un pronóstico de suministro eólico combinado agregando los pronósticos individuales de Qollpana I y II. Por el momento esto creará un pronóstico eólico para todo Bolivia el cual es de mayor exactitud comparado con los pronósticos individuales y tiene relevancia para el sistema de balanceo.
- Refinamiento del pronóstico de valores promedio por seis horas hacia valores promedio por hora en primer lugar. Esto ayuda a una planeación operativa más precisa en el CNDC.
- Como segundo paso, un posterior refinamiento de un pronóstico de series temporales cada hora a series temporales por cuarto de hora (es decir, valores promedio cada cuarto de hora) esto en beneficio de la estabilidad del sistema, tomando en cuenta las rampas de potencia eólica observadas. Esto puede reducir la activación de las reservas de control y por ende sobrecostos adheridos a la seguridad operativa.
- Además de las mejoras a corto plazo mencionadas anteriormente, el Centro de Modelación y Simulación Numérica de la Universidad Mayor de San Andrés puede desarrollar perfiles de velocidad del viento vs. energía eólica y preparar pronósticos de suministro propios (es decir, series temporales por cuarto de hora (MW)) para los parques eólicos Qollpana I y II basados en el ya refinado modelo meteorológico para la región de Qollpana.
- El Centro de Modelación y Simulación Numérica de la Universidad Mayor de San Andrés puede comenzar actualmente con el desarrollo de pronósticos fotovoltaicos (en MW, por cuarto de hora) basados en el parque FV Yunchará (región Tarija) después de la preparación del refinamiento del modelo meteorológico respectivo para esta área. Con estas actividades

valiosa experiencia será ganada para los planeados parques FV grandes Oruro y Uyuni.

- En paralelo, el sistema de cómputo del Centro de Modelación y Simulación Numérica de la Universidad Mayor de San Andrés necesita ser reemplazado por la aplicación de un servidor de vanguardia permitiendo un mayor rendimiento y con ello una entrega más rápida de las series temporales del pronóstico. Como opción a la solución de un servidor especial multi-núcleo de alto rendimiento la cual puede significar un alto costo, puede ser considerada también una arquitectura descentralizada Master-Client. Un ejemplo de GridLab es presentado en el Gráfico . Siempre que el software de modelado permita la división de tareas de cálculo, un servidor maestro (Master) central comparte la tarea de modelado entre varios servidores cliente (Client) conectados que son de estándar y, por lo tanto, reducir significativamente el presupuesto requerido.

Gráfico 15: Ejemplo de arquitectura de servidor Master-Client como una posible nueva arquitectura informática para un mayor rendimiento al modelar pronósticos para las ERV



Fuente: GridLab

3.2 Segunda etapa de las medidas de mejora del pronóstico con respecto al establecimiento de pronósticos para el suministro de energía eólica y fotovoltaica en todo Bolivia

En la segunda etapa, especialmente apoyada, por ejemplo, por el Centro de Modelación y Simulación Numérica de la Universidad Mayor de San Andrés, el esquema de pronóstico podría extenderse a pronósticos de suministro para todo Bolivia para energía eólica y fotovoltaica, también en la preparación de los

proyectos planificados de parques de ERV adicionales. Aunque los pronósticos de los parques locales son importantes para el modelado de pronósticos de congestión de la red, por el CNDC, el nivel de precisión es mucho mayor para los pronósticos regionales que contienen todos los parques de ERV. El establecimiento de tales pronósticos para el suministro eólico más precisos para todo Bolivia, pero también para el suministro fotovoltaico, será un factor clave para el equilibrio del sistema eléctrico boliviano, especialmente considerando el carácter aislado del área de control boliviana.

- Además de las áreas ya modeladas de Qollpana y Santa Cruz y del refinamiento del área del parque fotovoltaico Yunchará como medida de primera etapa, especialmente el Centro de Modelación y Simulación Numérica de la Universidad Mayor de San Andrés podría refinar el modelo meteorológico para otras áreas relevantes en Bolivia. Como primer paso esto se refiere a las áreas planeadas de los parques eólicos más grandes Oruro (región Oruro) y Uyuni (región Potosí).
- Con base en las áreas posteriores incluidas en el modelo de predicción meteorológica como desarrollo de la segunda etapa, además de preparar pronósticos para parques de ERV específicos también es posible la preparación de un pronóstico para todo Bolivia para suministro eólico y fotovoltaico (en MW, por cuarto de hora) y proveer al CNDC como una contribución significativa para un balance del sistema óptimo:
 - Pronósticos del suministro eólico para todo Bolivia abarcando los parques eólicos ya existentes Qollpana I y II, pero también los parques eólicos planificados Warnes, San Julián y El Dorado (región Santa Cruz) así como el parque eólico Qollpana III y el parque eólico La Ventolera (región Tarija), y cualquier parque eólico posterior conectado al sistema eléctrico boliviano.
 - Pronóstico del suministro FV para todo Bolivia abarcando el parque FV existente Yunchará y también los parques fotovoltaicos planificados Oruro (región Oruro) y Uyuni (región Potosí), y cualquier parque fotovoltaico posterior conectado al sistema eléctrico boliviano.
- En contexto de los procesos de planeación operativos en el CNDC, pronósticos anticipados eólicos y fotovoltaicos (en MW, por cuarto de hora) pueden ser proporcionados con 2 a 3 días de anterioridad al tiempo real y actualizaciones pueden ser provistas regularmente al CNDC con al menos un día de anterioridad e intradiario.

4 RECOMENDACIONES GENERALES PARA INTEGRAR ENERGÍAS RENOVABLES

Adicionalmente a las recomendaciones en específico para mejorar los procesos y la exactitud de los pronósticos como se describió en el capítulo 3, un número de recomendaciones generales para la integración de energías renovables se enlista a continuación:

- Implementar la **regulación de frecuencia automática y la función de control de la generación automatizado** como requisito para participaciones de sistemas de energías renovables significativas en la combinación de la generación.
- Definición de códigos de red específicos especialmente para todas las unidades/granjas de energías renovables conectadas a la red de la Transportista o Distribuidora.
- Durante los estudios de operatividad, **añadir como requerimiento para nuevas instalaciones que las instalaciones meteorológicas y de medición se encuentren operativas** e iniciando el proceso de recolección de información, que permita el pronóstico efectivo de las unidades de generación cuando estas entren en operación comercial.
- **Centralizar la información de todas las energías renovables conectadas a la red**, la localización, región, nodo de conexión al sistema, tamaño, tipo y parámetros importantes los cuales pueden determinar el resultado en función de las condiciones meteorológicas. Establecer una base de datos centralizada de toda la información relacionada a proyectos de energías renovables.
- Proporcionar al gestor de red independiente toda la información requerida en el código de red y relacionada con unidades de energías renovables para la planeación de la interrupción. Esto incluye el mantenimiento previsto o no de las unidades completas o de alguna de sus partes.
- **Los proveedores de pronóstico deberán ejecutar modelos de predicción** ello para alcanzar un pronóstico de generación de energías renovables de alta calidad con al menos **15 minutos de granularidad**. Esto incluye el desarrollo de modelos, el mantenimiento y la mejora continua de la calidad provista por los modelos.
- Los proveedores de pronósticos deberán proveer **pronósticos de generación de energías renovables con 2 o 3 días de anticipación hasta el intradía** al gestor de red independiente ello para estimar la carga a ser cubierta por medio de generación convencional. Esta información incrementará la eficiencia en la programación de unidades base (planificadas para funcionar en los días siguientes).
- Optimizar por medio de la **combinación de pronósticos de energías renovables de diferentes proveedores para un pronóstico final**, ejemplo, por

medio de un enfoque ponderado considerando la exactitud de los diferentes proveedores en los pronósticos pasados.

- Proveer retroalimentación sobre el grado de exactitud del pronóstico al proveedor de servicios respectivo
- Agrupar en el pronóstico del día anterior (D-1) todos los itinerarios de cada unidad de energía renovable conectada a la red para preparar un **itinerario combinado de todo el rendimiento de energía renovable en cada región**. Es útil contar con una función central la cual incorpora esta información para evitar tener muchas partes interactuando directamente con el departamento de planeación.
- Recopilar información en tiempo real del clima de estaciones de referencia meteorológicas para incrementarla y usarla para la estimación de generación de energía renovable nodal. Es lógico que la estimación de la generación por energía renovable la cual es esencial en la predicción de la generación por energía renovable se agrupa en la ubicación central.
- Monitorear la generación proyectada, desbalances netos (en generación y demanda) y el margen de reserva rotante en tiempo real, ya sea a nivel de región o de sistema.
- **Asistir el balanceo de cada área de control al proveer los pronósticos de energía renovable** y la necesidad de reprogramar la generación para tomar en cuenta los cambios en el pronóstico.
- Posiblemente proveer asistencia al gestor de red independiente para reprogramar la generación convencional hasta 15 minutos antes del tiempo real para compensar los cambios en los programas de energía renovable los cuales son detectados por el pronóstico de ER.
- Sin la reprogramación recomendada en el punto anterior, la experiencia muestra la necesidad de **balancear la generación por energía renovable a veces mayor al 10% de la capacidad renovable instalada**. Este es el efecto de la diferencia entre la generación real y la generación pronosticada en el D-1.
- Posiblemente prever intercambios entre regiones para balancear los cambios en la producción de renovables en cada región.
- Organizar el **acceso al control de la generación renovable** al gestor de red independiente (ISO) en caso de emergencia (acceso directo vía SCADA).
- **Proveer información sobre la generación por renovables proyectada por nodo eléctrico** a la despachadora nacional para que el sistema de seguridad pueda ser administrado y controlado en términos de posible congestiones y estabilidad del voltaje en la red relativo al nivel de generación por renovables por nodo.

- El gestor independiente de red **especificará en que frecuencia desea contar con pronósticos actualizados por nodo** en consonancia con los estudios de seguridad del sistema que se realizan en la operación de la red.
- **Proveer información en el nivel proyectado de generación por renovables a todos los departamentos involucrados** del sistema eléctrico, por ejemplo, a las compañías de generación, comercializadoras, agentes responsables del balanceo (BRPs) y proveedores.
- Como parte del post-análisis, **evaluar el desempeño de las unidades de reserva** convencionales en términos de tiempo de reacción y cuantificación del aporte de regulación.
- A mediano y largo plazo **evaluar periodos cíclicos (hídricos) de sobre oferta de generación eléctrica** en otros mercados con la finalidad de encontrar potenciales sinergias de cooperación de reserva transfronteriza.
- Basado en interconexiones, **establecer una cooperación de control de reserva transfronteriza** ello para limitar las reservas requeridas y reducir los costos dedicados a ello.
- Registrar mediciones en tiempo real de las condiciones del clima y de la producción de energías renovables.
 - El propósito principal es medir la producción de energías renovables efectivamente incorporada a la red con fines contables y para administrar los contratos con los proveedores de energías renovables.
 - Un segundo propósito es proveer mediciones en tiempo real al sistema SCADA.
 - Un tercer propósito es emplear la retroalimentación de las mediciones para mejorar continuamente los modelos de predicción.
 - Finalmente, evaluar la disponibilidad de señales con una periodicidad mensual, para identificar que agentes (generadores y/o proveedores de energía renovable) cumplen con la transferencia en tiempo real de información, así como la calidad de información siendo remitida al operador.

5 ADJUNTOS

5.1 Ejercicios de la capacitación

Gráfico 6: Ejercicios del taller (1), actividades relacionadas con el RMSE

Actividad 1

Raíz del error cuadrático de la media (RMSE)

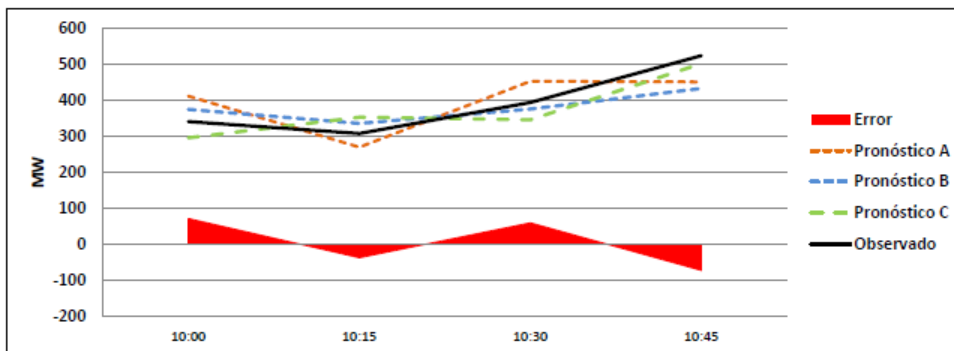


Nombre: _____

Compañía: _____

Tiempo [hrs. am]	10:00	10:15	10:30	10:45
Pronóstico A	411	269	452	450
Pronóstico B	374	335	375	432
Pronóstico C	295	352	345	501
Observado	340	307	393	523
Error	71	-38	59	-73

Suposición: potencia eólica instalada total de 700 MW



Actividad 1

Raíz del error cuadrático de la media (RMSE)



Pregunta 1: ¿A qué curva de pronóstico (A, B, C) corresponde la curva de error proyectada?

Pregunta 2: ¿Cuál de las curvas de pronóstico (A, B, C) describe evidentemente un pronóstico de día anterior 8 a.m., día anterior 8 p.m. o intradía 8 a.m.?

Fuente: EGI/GridLab

Gráfico 7: Ejercicios del taller (2), actividades relacionadas con la tendencia

Actividad 2 Cálculo de tendencias (Bias)



Nombre: _____

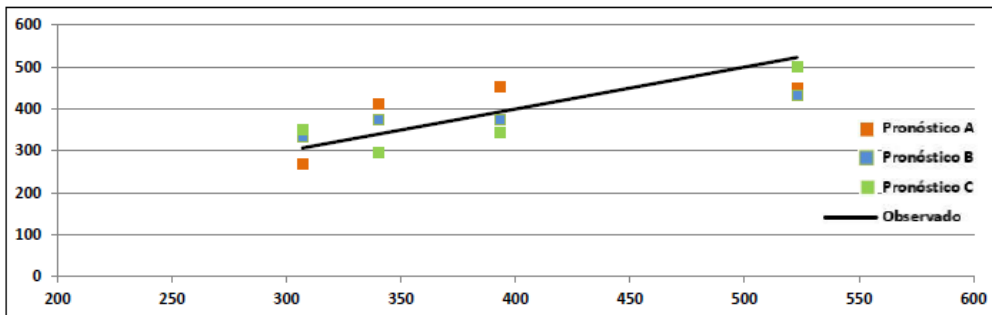
Compañía: _____

Tiempo [hrs. am]	10:00	10:15	10:30	10:45
Pronóstico A	411	269	452	450
Pronóstico B	374	335	375	432
Pronóstico C	295	352	345	501
Observado	340	307	393	523

Tendencia = **-11,8 MW**

Error max. pos. = **10,0%**

Error max. neg. = **-17,4%**



Actividad 2 Cálculo de tendencias (Bias)



Pregunta 1: ¿A qué curva de pronóstico (A, B o C) corresponde el resultado del cálculo de tendencias de la gráfica?

[Fuente: EGI/GridLab]

5.2 Lista de presentaciones de la capacitación

- Bienvenida a la capacitación sobre pronósticos para ERV
- Panorama general sobre el desarrollo de las ERV en Alemania
- Experiencia operativa en pronósticos para ERV a nivel regional e internacional

- Pronóstico para la producción de ERV
- Pronóstico para la producción de ERV_ejemplo Qollpana
- Estimaciones de la producción de ERV
- Perspectiva a futuro de las metodologías de pronóstico
- Lineamientos para los servicios de predicción
- Recomendaciones generales para la integración de ERV

5.3 Información de contacto del facilitador de la capacitación

En representación de Elia Grid International:

Dr. -Ing. Matthias Müller-Mienack

Director del Departamento de Investigación y Estudios

Correo electrónico: matthias.mueller-mienack@gridlab.de

Tel.: +49 30 600 866 80

LinkedIn: [Matthias Müller-Mienack](#)

Página de internet: <http://www.gridlab.de>



GridLab GmbH

Mittelstraße 7

12529 Schönefeld (cerca de Berlín)

Alemania

Título: Informe de diagnóstico:
Pronóstico de Generación Eólica y Solar en Bolivia

Autor: Dr. Ing. Matthias Müller-Mienack

Desarrollado por: Elia Grid International GmbH en cooperación con
GridLab GmbH

Supervisado por: Ministerio de Energías a través del Viceministerio de
Electricidad y Energías Alternativas

Ejecutado por: Deutsche Gesellschaft für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Programa: Programa de Energías Renovables (PEERR)

Programa Nø: 15.2035.2-001.0

Coordinador: Dr. Johannes Kissel

Equipo técnico: Arturo Loayza Ordóñez
Alejandra Prada Rivero

Fecha: Noviembre, 2017

1. Este informe es apoyado por la Cooperación Alemana a través de la GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GmbH) y su Programa de Energías Renovables (PEERR).

2. Se autoriza la reproducción total o parcial del presente documento, sin fines comerciales y citando adecuadamente la fuente, previa autorización escrita por los coordinadores del estudio.

Ministerio de Energías

Calle Potosí esquina calle Ayacucho S/N, zona Central
Teléfono: 2188800
www.minenergias.gob.bo

Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas

Edificio Ex BBA, Av. Camacho N° 1413 Esq. calle Loayza
Teléfono: 2188800

Cooperación Alemana al Desarrollo con Bolivia

Oficina de la Cooperación Alemana al Desarrollo
Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Av. Julio C. Patiño N° 1178, entre calles 17 y 18, Calacoto
Casilla 11400
La Paz, Bolivia

Oficina del Programa de Energías Renovables (PEERR)
Av. Sánchez Bustamante N° 504 entre calles 11 y 12 de Calacoto
La Paz, Bolivia
T +591 (2) 2119499
F +591 (2) 2119499, int. 102
E johannes.kissel@giz.de
I www.giz.de

Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ)

BMZ Bonn
Dahlmannstraße 4
53113 Bonn, Germany
T +49 (0) 228 99 535 -0
F +49 (0) 228 99 535-3500
poststella@bmz.bund.de
www.bmz.de

BMZ Berlín
Stresemannstraße 94
10963 Berlin, Germany
T +49 (0) 30 18 535 - 0
F +49 (0) 30 18 535-2501



Implementada por:

