

LA ENERGÍA EÓLICA EN ALEMANIA: EXPERIENCIAS A TENER EN CUENTA PARA EL CASO COLOMBIANO

Idi Amin Isaac^{*†}, Helmuth Biechl, Jorge Wilson Gonzalez^{*}

^{*}Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, of. 11-261, Medellín, Colombia.

Recibido 9 Noviembre 2008; aceptado 10 Diciembre 2008
Disponible en línea: 17 Diciembre 2008

Resumen: En el presente artículo, se realiza una descripción general de los aspectos relacionados con el inicio, desarrollo, situación actual y perspectivas de la energía eólica en Alemania. Se trabajan tópicos como el marco regulatorio, la descripción del potencial eólico y algunas problemáticas técnicas y operativas experimentadas por algunos operadores de red del sistema Alemán. Finalmente, se plantean, guardando las proporciones, algunas comparaciones con el caso colombiano y los respectivos análisis para el proceso de implantación masiva de la energía eólica en Colombia. *Copyright © 2008 UPB*

Abstract: A general description of the aspects related to the beginning, development, current state and future of wind power in Germany is presented. Some topics like green energy policies, energy potential and some technical and operative problems are showed. Finally, many useful ideas extracted from German experience are presented, in order to provide guidelines for the future development of WE in the Colombian power system.

Keywords: Wind Energy (WE), Power system planning, Electric Networks, Germany, Colombia, Renewable Energy.

1. INTRODUCCIÓN

El progresivo aumento del calentamiento global, así como el elevado precio y sucesivo agotamiento de los combustibles fósiles, ha precipitado el interés del mundo, especialmente de las potencias, por trazar metas claras en aras de reducir las emisiones de gases contaminantes a

través de la implementación de energías renovables; basta mencionar que hoy en día más de 66 países tienen objetivos ambientales definidos, entre ellos 27 de la Unión Europea, 29 estados de USA y 9 provincias canadienses, entre otros (Worldwatch-Institute, 2008).

El caso Alemán se constituye en un referente mundial obligado en el desarrollo de energías alternativas, tanto así que a finales de 2006 era el

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+574) 415 90 20.
E-mail: idi.isaac@upb.edu.co (Idi Isaac).

primer país en capacidad instalada de energía eólica y solar fotovoltaica (EWEA, 2008, Molly, 2008), tercero en solar térmica y cuarto en biomasa; consecuencia de lo anterior, las emisiones de CO₂ han ido decreciendo conforme aumenta la penetración de recursos limpios. Ver [Fig.1](#).

El presente trabajo analizará una de las energías renovables más impulsadas en la actualidad a nivel mundial: la *energía eólica*, y por ser Alemania líder indiscutido en tecnología, esquemas regulatorios para el mercado y experiencia operativa del sistema, será este caso particular el que servirá como referente.

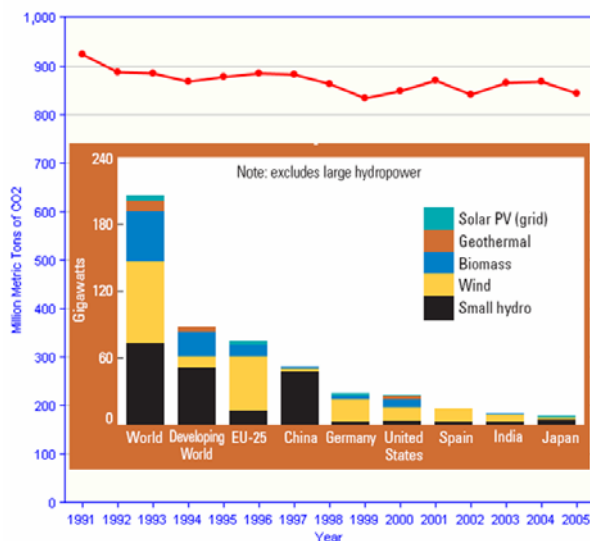


Fig. 1. Arriba. Emisiones de CO₂ en Alemania. Abajo. Principales países en capacidad instalada de recursos renovables a 2006. Adaptación de (Worldwatch-Institute, 2008) (EIA, 2008)

El estudio que a continuación se presenta, inicia con un breve análisis de la estructura regulatoria y de incentivos implementada como estrategia gubernamental en Alemania a partir de la institución de la ley de energía renovable (LER); posteriormente se describe los aspectos relacionados con las características del recurso eólico y su potencial; seguidamente se muestra algunos resultados de estudios e investigaciones adelantadas para solucionar problemas operativos netamente técnicos, y finalmente se plantean algunos tópicos extraídos de la experiencia alemana, que podrían resultar útiles para la implantación masiva de la generación eólica en Colombia.

2. POLÍTICAS GUBERNAMENTALES Y REGULATORIAS DEL SECTOR EÓLICO EN ALEMANIA

La energía eólica en Alemania es controlada directamente por el *Ministerio Federal del Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear*; este organismo, en asocio con el parlamento y contando con la participación activa de los operadores de las redes de transmisión (TSO) y otros agentes del sector, han definido reglas de juego que garantizan la implantación actual y futura no sólo de parques eólicos, sino también de una amplia gama de energías renovables.

2.1. Antecedentes Históricos.

La reestructuración del sector energético Alemán tuvo inicio con la promulgación de la ley de alimentación de electricidad (StrEG) que se remonta a enero de 1991. Por su precariedad en materia de energías renovables fue sustituida en abril de 2000 por la Ley de Energías Renovables (LER). A partir de su instauración, la LER fue modificada en los años 2004 y 2008, este último complemento entrará en vigencia en enero de 2009. El objetivo de las modificaciones introducidas a la LER, especialmente de la última, fue garantizar la total consonancia de la política energética alemana con los objetivos vinculantes que fueron firmados por la Unión Europea en la declaración del 9 de marzo de 2007, donde se elevaban las metas de penetración de energías renovables hasta un 20% para el año 2020 (EU, 2005).

Tal fue el impulso que la legislación brindó al sector de energías renovables de Alemania, que se alcanzaron las metas trazadas fácilmente, siendo necesario redefinirlas: para el 2010 se esperaba tener un 12.5% del consumo total satisfecho a través de estos recursos y fue elevado al 15%, para el 2020 se espera un 27% y para el 2030 un 45%.

2.2. Incidencia de la LER en el sector de energía eólica.

El efecto de la LER en el sector de la energía eólica ha abarcado múltiples aspectos de gran significancia, tales como generación de empleo, impulso al desarrollo tecnológico e impacto al

usuario final.

A 2006 se tienen datos de que 214.000 empleos directos e indirectos han sido inyectados al sector productivo Alemán por la industria eólica, 124.000 de ellos fueron creados en virtud de la LER. (Alemania, 2007).

Por su parte, el usuario final ha experimentado un efecto costo-beneficio positivo, dado que con la institución de la *generación por méritos* la energía eólica ha introducido ahorros del orden de 5000 M€ reduciendo entre otros la importación de carburantes en cerca de 900M€

La tecnología y los fabricantes de equipos asociados con la generación eólica también han experimentado cambios positivos a partir de la LER, por ejemplo, muchos operadores de red han entrado en la revolución de las centrales virtuales (vía Internet), han mejorado sus esquemas de gestión de carga y las estrategias de almacenamiento de energía. Además de lo anterior, la LER plantea grandes retos para el sector tecnológico, promoviendo a través de mejores incentivos y retribuciones la *repotenciación* de los parques eólicos existentes y la implantación de instalaciones *off-shore* (DEWI 2005) (ISET, 2008).

Finalmente, podría concluirse que el hecho de que a partir de 1991 los costos de producción de la energía eólica hayan bajado más de un 60%, hasta llegar hoy en día a valores entre 5-8 U\$/kWh (Worldwatch-Institute, 2008), guarda estrecha relación con la institución de un marco regulatorio sólido y bien estructurado.

Una vez explorada la estructura político-regulatoria de la energía eólica en Alemania, a continuación se procederá a describir el estado actual y el potencial eólico de dicho país.

3. ANÁLISIS DEL RECURSO EÓLICO EN ALEMANIA

Alemania cuenta con un potencial eólico bastante alto, distribuido a lo largo de su territorio continental (on-shore) y en los mares del Norte y Báltico.

La [Fig. 2.](#) ilustra la distribución de vientos en Alemania por región, incluyendo el potencial por

desarrollar y el aumento de la capacidad instalada gracias a la repotenciación de los primeros parques eólicos. Debe prestarse especial atención al hecho de que las mejores condiciones de viento se presentan al norte, con velocidades que incluso alcanzan los 8m/s a 80m de altura. En la Tabla 1 se ilustran las regiones con mayor capacidad instalada de energía eólica con datos actualizados a mediados del 2008.

Tabla 1. Regiones Alemanas con mayor capacidad eólica instalada a 30.06.08. Adaptado de (Molly, 2008)

	REGIÓN	CAPACIDAD INSTALADA (MW) 30.06.08
1	Niedersachsen	5.799,96
2	Brandenburg	3.528,36
3	Sachsen-Anhalt	2.964,26
4	Schleswig-Holstein	2.621,21
5	Nordrhein-Westfalen	2.601,06

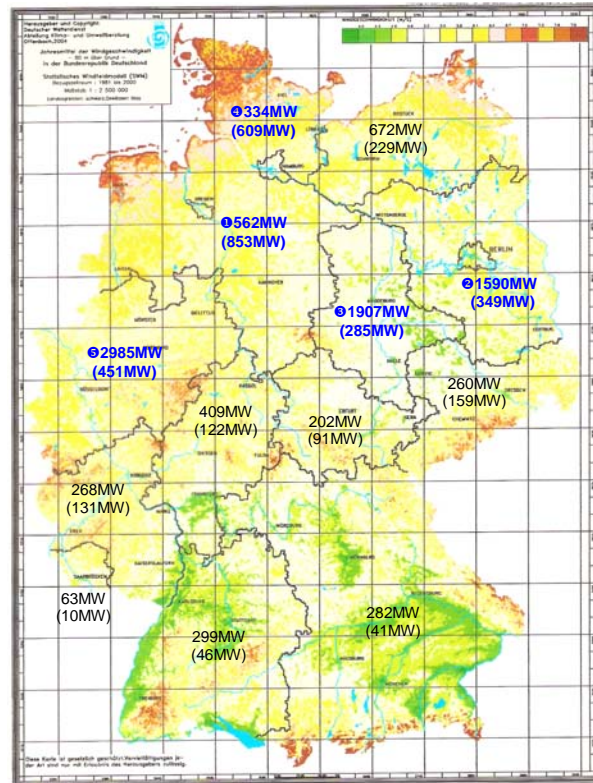


Fig. 2. Mapa de vientos de Alemania con los potenciales on-shore por regiones. En paréntesis el posible aumento de capacidad instalada por repotenciación. (DEWI 2005) (Biechl, 2007).

Sin lugar a dudas, toda esta riqueza en el recurso eólico, aunada con los fuertes capitales invertidos en desarrollo tecnológico e investigación, han posicionado a Alemania en el primer puesto mundial (22.000MW), lejos de USA y España

(18.000MW y 12.000MW) (AWEA, 2008) (GWEC, 2008). Ver Fig.3. Los escenarios proyectados son incluso más ambiciosos; asumiendo como estrategias, el desarrollo las instalaciones off-shore (ISET, 2008) y la repotenciación, Alemania apuesta a los 48.000MW de capacidad instalada al llegar el 2020, lo cual supone duplicar la potencia actual en tan solo 12 años.

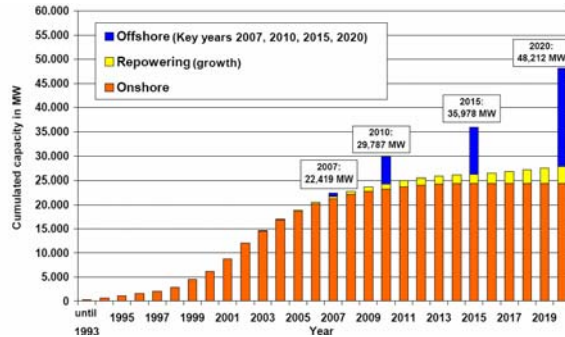


Fig. 3. Proyección de la capacidad acumulada de WE hacia 2020 (DEWI 2005)

Teniendo más claridad acerca del por qué Alemania es el referente mundial en energía eólica, a continuación se procederá a analizar los aspectos técnicos más relevantes asociados con dicha generación y el sistema eléctrico alemán en general.

4. ASPECTOS TÉCNICOS ASOCIADOS CON LA GESTIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA DENTRO DEL SISTEMA ELÉCTRICO ALEMÁN

La magnitud de la potencia eólica manejada y su alto grado de variabilidad, demandan del Sistema Eléctrico Alemán condiciones de desempeño en régimen normal y de falla bastante exigentes. Ver Fig.4. A pesar de contar con un sistema de transmisión enmallado y altamente tecnificado, se han presentado problemas operativos, que motivan a la investigación e incitan a los expertos en planeación a diseñar los refuerzos necesarios para superarlos. Como si fueran pocas las restricciones de tipo eléctrico, para la realización de tales estudios se deben armonizar los criterios y soluciones propuestas por los cuatro grandes operadores de red (E.ON Netz, VET, RWE Net y EnBW Transp.) e incluir en el análisis las múltiples interconexiones activas con otros países de la UCTE (Bachmann, 1999) (Breulmann, 2000).

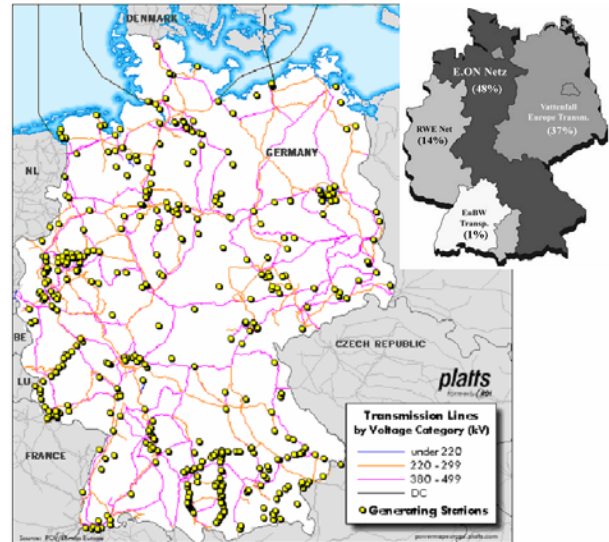


Fig. 4. Sistema Eléctrico Alemán con sus operadores de red. Adaptación de (GENI, 2008) (DEWI 2005)

4.1. Principales problemas operativos.

La excesiva cantidad de generación eólica en la franja nor-central de Alemania, ha provocado múltiples inconvenientes en el sistema de transmisión; se han superado los límites térmicos de las líneas (muchas de ellas a 110kV) lo que se traduce en verdaderos *cuellos de botella* que hacen evidente la necesidad de repotenciación (Matevosyan, 2006). Mientras que las soluciones definitivas tienen lugar, el manejo del problema se hace vía control de generación y empleando otras estrategias como las mencionadas en (Jacobs, 2007) y (Estanqueiro, 2007).

La experiencia operativa ha permitido identificar que algunos corredores críticos para la transmisión se encuentran en las regiones de Schleswig-Holstein y Lower Saxony, donde las mejoras a la red de 110kV resultan prácticamente imprescindibles.

En cuanto a la transmisión de la potencia de los futuros parques off-shore a los grandes centros de carga como Ruhr y Frankfurt, los entes planeadores han pensado en líneas de extra alta tensión (EHV).

En la Fig.5, se muestran algunos refuerzos de transmisión requeridos por el sistema alemán hacia el 2015; nótese que la ubicación

corresponde en su mayoría a las áreas críticas de la franja nor-central y que sólo contando el nivel de 380kV se planea construir más de 850km de líneas.

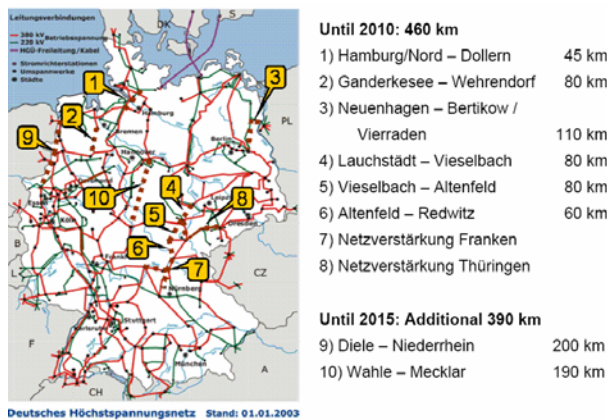


Fig. 5. Refuerzos de transmisión requeridos en LT de 380kV para el horizonte de 2010 -2015. (DEWI 2005)

4.2. Resultados alcanzados por los estudios desarrollados por E.ON Netz.

Quizás el principal actor en las investigaciones adelantadas en pro de resolver parte de la problemática asociada con las restricciones operativas relacionadas con la energía eólica, es *E.ON Netz*, el mayor operador del sistema eólico alemán; por tal razón, el análisis que a continuación se hace se circunscribe a la gestión de empresa mencionada.

Según (Ackermann, 2005), vale la pena comentar los resultados de uno de los estudios más importantes. El equipo de trabajo de *E-ON Netz* tuvo presente casi la totalidad de la red UCTE de 220kV, incluyendo 2300 líneas de transmisión, 820 transformadores, 500 generadores y 50 equivalentes de parques eólicos ubicados en el norte Alemán, representando cada parque con una máquina equivalente, simplificación que para efectos de análisis de estabilidad en pequeña señal puede considerarse válida (Hansen, 2001) y (CIGRE, 2007).

Con el modelo equivalente empleado, se realizaron estudios de estabilidad de tensión, frecuencia y pequeña señal. Se identificaron oscilaciones inter-área en los rangos de frecuencia 0.22-0.26Hz, que fueron amortiguadas por la red

existente sin mayor problema y se detectó un posible déficit de potencia reactiva, situación que evidenció la vulnerabilidad del sistema. Un tratamiento teórico del asunto se hace en (El-Arroudi, 2007)

El grupo de estudio se planteó y buscó solucionar interrogantes puntuales en diversos aspectos:

- El manejo de la desviación de frecuencia. Un trabajo importante al respecto se presenta en (Luo, 2007).
- ¿Cómo estimar el gradiente de potencia activa que un Parque Eólico (WF) puede inyectar después de una falla?
- ¿Hasta donde debe llegar la capacidad de sobrecarga de las líneas a la hora de realizar el control primario?
- ¿Existe necesidad de implementar estrategias para el back-up de la tensión?

A partir de los resultados de esta investigación, se incluyeron modificaciones mucho más exigentes al código de conexión de *E.ON Netz* para EHV-HV (*E.ON*, 2003); la principal de ellas fue el endurecimiento de los requerimientos dinámicos de los aerogeneradores en régimen de falla. Medidas adicionales como la recalibración de las protecciones de baja frecuencia a 47.5Hz, la implementación de compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC) y de equipos FACTS para mejorar la respuesta dinámica de la red, también fueron tenidas en cuenta, como se sugiere en (Han, 2008).

A manera de ejemplo, en la [Fig.6\(a\)](#) se ilustran los nuevos requerimientos dinámicos para los aerogeneradores y en la [Fig.6\(b\)](#) se muestra la mejora introducida por las nuevas exigencias, para el caso de una falla trifásica en 380kV aplicada al equivalente de red antes mencionado. En (Rosas, 2003) y (Soens, 2005), se analiza en detalle requisitos dinámicos como el fault ride through (FRT) .

5. LA ENERGÍA EÓLICA: DEL CASO ALEMÁN AL COLOMBIANO.

Quizás la mejor estrategia para lograr un alto nivel de desarrollo y competitividad en cualquier campo, es la emulación de los buenos ejemplos. Para el caso de la energía eólica, Alemania se

constituye en el referente obligado del cual se deben tomar los aspectos positivos. Por tal motivo, a continuación se procederá a plantear algunos aspectos generales que podrían facilitar el proceso de implementación masiva de este recurso renovable en nuestro país.

El análisis se hará teniendo presente cada uno de los ítems trabajados anteriormente para el caso Alemán.

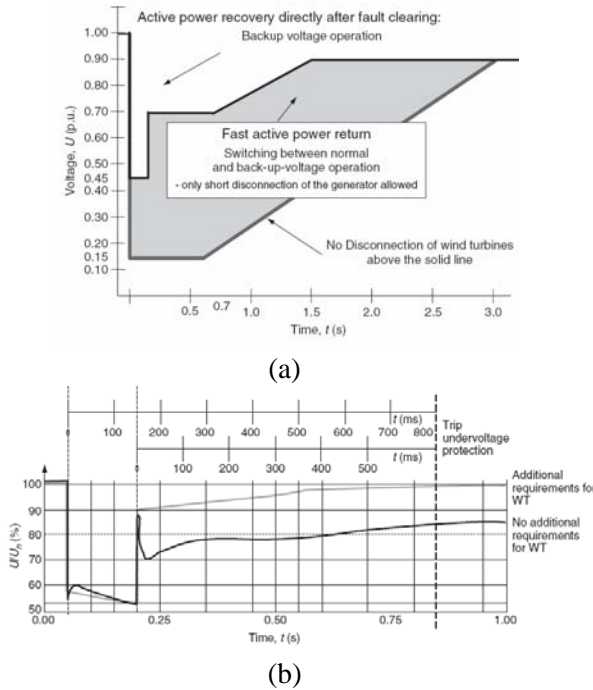


Fig. 6 (a) Nuevos requisitos dinámicos para aerogeneradores E.ON Netz. (b) Comparación del desempeño dinámico en tensión de un aerogenerador con y sin los nuevos requisitos. Adaptado de (Ackermann, 2005)

5.1. Recursos de generación.

Desde el punto de vista de recursos energéticos, Colombia podría considerarse como un país privilegiado. Abundancia en potencial hídrico, eólico y carbón mineral, garantizan (de acometerse las obras) el abastecimiento actual y futuro de la demanda, aportando incluso los excedentes necesarios para la exportación.

Las cifras oficiales señalan que el potencial hidroeléctrico colombiano es del orden de 87GW y el recurso carbonífero probado alcanza las 7,063.58 millones de toneladas (UPME, 2008, UPME, 2006b). Lo anterior explica en parte, el

por qué del escaso interés gubernamental por implementar energías renovables.

Aunque el foco de análisis del presente trabajo es la *energía eólica*, a manera de contextualización, se compilaron en la Tabla 2 las cifras más representativas en cuanto a energías renovables en Colombia. Como era de esperarse, la implementación es aún precaria

Tabla 2. Estado actual de los Recursos Renovables en Colombia. Adaptado de (UPME, 2006a, UPME, 2008, UPME, 2006b).

ESTADO APROXIMADO DE RECURSOS RENOVABLES EN COLOMBIA				
FUENTE	CONOCIMIENTO DEL RECURSO	APLICACIONES	ESTADO	CAPACIDAD INSTALADA
Solar	Atlas de radiación solar de Colombia. (Distribución de radiación anual y mensual)	Sistemas fotovoltaicos. Colectores solares	Aplicada con problemas de calidad y de eficiencia	> 2MW
Biomasa	Estimativos preliminares. <ul style="list-style-type: none"> • Bagazo de Caña. • Cascañilla Arroz. • Rellenos Sanitarios • Palma de Aceite. 	Calderas. Cogeneración Obtención de Biodiesel.	Alguna aplicaciones	> 25 MW solo bagazo Excedente producción de aceite de palma suficiente para suplir potencialmente el 5% de la demanda nacional de ACPM.
Eólica	Atlas de energía eólica y vientos de Colombia (velocidades y densidades energéticas)	<ul style="list-style-type: none"> • Bombeo de agua. • Generación sistemas aislados. • Generación interconectada SIN 	Se aplica	50 kW marginal 19.5 MW (Jepirachi)
PCH	Información abundante de caldas, caudales y recursos hídricos	Generación eléctrica a baja escala.	Se aplica a costos altos	> 168 MW
Geotérmica	Mapas de recursos geotérmicos. Estudios preliminares de zonas de interés.	Generación eléctrica. Suministro de calor.	No se aplica	N.D.

En cuanto se refiere al recurso eólico, podría decirse que el avance más importante ha sido la publicación del *Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia*. Dicho estudio se constituye en la herramienta básica para la estimación preliminar del potencial y la identificación en el territorio nacional de las zonas que mantienen velocidades de viento altas y persistentes a lo largo del año. Se destacan dentro de ellas, la península de La Guajira, el centro del litoral caribe en Bolívar, la Isla de San Andrés y algunos sectores de Boyacá.

Para el caso más idóneo (Península de la Guajira) se pueden aproximar densidades de energía eólica entre 1.000 y 1.331 W/m^2 , medidas a 20m de altura o incluso entre 2.744 y 3.375 W/m^2 , para extrapolaciones a 50m; estos valores son bastante buenos, incluso están muy por encima de los registros en parques Alemanes (UPME, 2006a). Ver Fig. 7.

Tomando datos de (UPME, 2006a) y efectuando cálculos aproximados, se pueden obtener fácilmente potenciales del orden de 5000-6000MW sólo en la Guajira, excluyendo las instalaciones mar adentro (Rodríguez, 2004). Cifras tope de 22.000MW también son manejadas desde el Ministerio de Minas y Energía (Martinez, 2007). Aunque hacen falta más estudios de estimación de potencial eólico, indiscutiblemente, este recurso es muy importante y debe tenerse en cuenta para futuros planes de expansión de generación y transmisión como una alternativa viable.

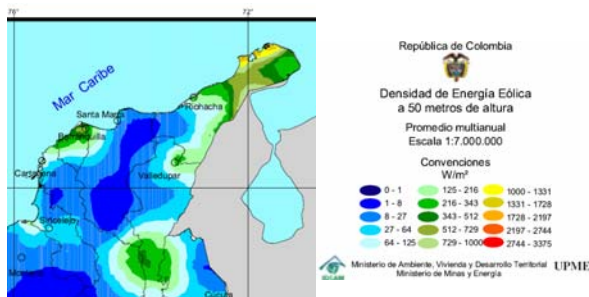


Fig. 7. Mapa de densidad de energía eólica a 50m de altura para la península de la Guajira. Adaptado de (UPME, 2006a)

5.2. Aspecto político-regulatorio.

En Colombia no existe una ley que regule la explotación e incentive la incorporación de los recursos renovables de manera decidida a los planes energéticos. En la actualidad, el país carece de una meta ambiental clara y acotada en el tiempo.

Los entes encargados de manejar la problemática de los recursos renovables son los Ministerios de Minas y Energía (MME) y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). Actualmente, sus directrices apuntan decididamente a impulsar los biocombustibles y la explotación de carbón, muy a pesar de poner en riesgo la seguridad alimentaria y de agotar combustibles fósiles que en un futuro pueden servir como despensas energéticas del país (Martinez, 2007).

Como avances en el aspecto normativo, pueden citarse la propuesta de actualización de la norma de fuentes fijas (agendada para el primer semestre de 2008), el ajuste de los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas existentes y nuevas, así como desarrollos

en materia de monitoreo, controles al origen del carbón y sistemas de control de emisiones (UPME, 2006b).

Otra iniciativa importante tiene que ver con el *Plan Energético Nacional 2006-2025*. En dicho documento se plantean varias estrategias relacionadas con la implementación de las energías renovables, principalmente enfocadas a la alimentación de zonas rurales y no interconectadas. Las sugerencias apuntan a la definición de subsidios directos y la reestructuración de otros existentes, así como el fortalecimiento de los esquemas institucionales para promoción y desarrollo.

5.3. El Sistema Eléctrico Colombiano.

El Sistema Eléctrico Colombiano es marcadamente centralizado, la mayor parte de la generación y la carga se encuentran en la zona andina, al igual que los principales enmallamientos de la red de transmisión. Desde el punto de vista de la generación, la hidroelectricidad prima sobre el recurso térmico en proporciones cercanas a 65%-35%. En cuanto a interconexiones internacionales, prácticamente sólo se tienen activas las líneas con Ecuador (Aproximadamente 500MW), ya que por aspectos políticos, las interconexiones con Venezuela se encuentran la mayor parte del tiempo fuera de servicio. En desarrollo se encuentran los estudios de la interconexión con Panamá (300MW) que empleará corriente directa. Otras posibles interconexiones son mencionadas en el numeral siguiente y pueden ser citadas del mismo Presidente de la República (Uribe, 2008).

Como puede observarse en la [Fig.8](#), la zona de mayor potencial eólico (La Guajira, Norte del País) está prácticamente aislada del Sistema de Transmisión Nacional (STN), tan sólo algunas líneas de 115kV, marcadamente radiales, algunas de ellas privadas, y muy débiles, podrían eventualmente servir como precarios corredores para la energía eólica que se generaría a futuro; desde luego, deben realizarse los análisis de condición actual para garantizar la seguridad del sistema (Grijalva, 2007).

De lo anterior, la conclusión obligada es que los refuerzos de transmisión son imprescindibles, si en algún momento se quiere aprovechar el recurso eólico de la Guajira; más aún si se tiene en cuenta que redes tan débiles pueden colapsar

ante una mala planeación, incluso en sistemas altamente enmallados como los europeos (Ribrant, 2007).

La topografía y los altos costos de transporte (por la lejanía de los puertos) obligan a prorrogar de manera indefinida proyectos eólicos en la zona andina del país. Por su parte, el archipiélago de San Andrés y Providencia podría constituir otro “laboratorio” similar al parque Jepirachi (Ver numeral siguiente), para empezar a estudiar la energía eólica, pero para alimentación aislada.

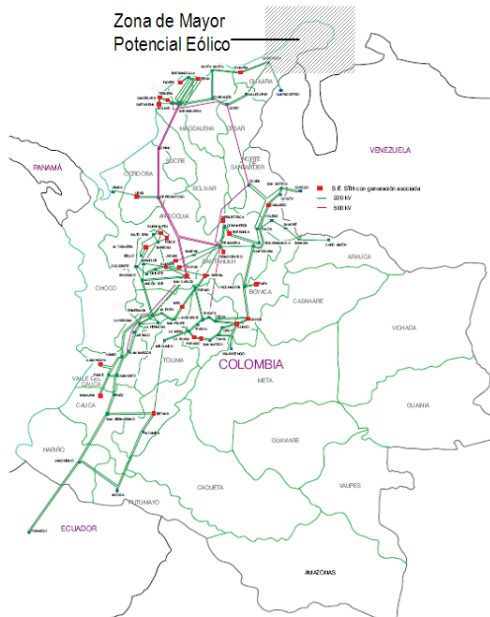


Fig. 8. Sistema de Transmisión Nacional de Colombia. Zona de mayor potencial eólico
Adaptado de (UPME, 2008)

5.4. Experiencia técnica, investigación y operación.

5.4.1 Parque Eólico Jepirachi.

Colombia cuenta con tan sólo un proyecto eólico: *Jepirachi*, con una capacidad instalada de 19.5 MW, ubicado en la Guajira y propiedad de Empresas Públicas de Medellín -EPM-. Ver [Fig. 9](#).

La generación de Jepirachi no produce mayores impactos ambientales, contribuye a reducir los gases de efecto invernadero y no involucra combustión. Pero igualmente presenta algunas limitaciones como la cantidad de energía generada en razón a la intermitencia de los vientos, por lo cual no puede atender una

demanda continua y debe estar asociada con otras fuentes.

Este primer proyecto se hizo viable gracias factores como el nivel de velocidad de los vientos en *La Guajira*, la condición especial del puerto, facilidades de transporte terrestre, la zona aduanera especial y el impacto mínimo sobre el medio ambiente (Rodríguez, 2008).



JEPIRACHI WIND PARK	
Owner	EPM (Colombia)
Topology	Double Line (8+7 WT)
WT Manufacturer	NORDEX (1.3MW-690V-60Hz)
Transmission	800m connection between WP to Transmission line Cuestecitas-Puerto Bolivar
Wind Variation	Extremes (3-18m/s) Direction: Alisios Winds (E-W) Mean: 9.85 m/s @ 50m

Fig. 9. Ubicación y principales características del Parque Eólico Jepirachi.
Adaptado de (Isaac, 2007)

La experiencia de Jepirachi, ha permitido identificar aspectos que es necesario estudiar para el mejoramiento de las condiciones de la generación eólica como: transferencias, licencias, despacho, cargo por confiabilidad, pronóstico para oferta, oferta y despacho en el Mercado Eléctrico Mayorista.

Actualmente, en Colombia se cuenta con un portafolio potencial de 31 proyectos de energías limpias, correspondientes al sector energético en diferentes categorías y etapas de formulación. Además de Jepirachi, sobresale otro proyecto eólico (Jouktai), con una capacidad registrada de 20MW, también en la Guajira, el cual ha superado la etapa de estudios de conexión (UPME, 2008).

5.4.2 Estudios del Plan de Expansión 2008-2020.

El Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2008-2020 presenta otro estudio

relacionado con el sector eólico, donde se combina este recurso alternadamente con carbón mineral e hidroelectricidad y se evalúan los impactos económicos y de cubrimiento de la demanda.

En el caso mencionado, se analiza el Sistema Eléctrico Colombiano, teniendo en cuenta las interconexiones internacionales en el periodo 2008-2022. Se contempló un escenario alto de demanda de energía hasta el 2013 en Colombia, y medio para el resto del horizonte. La proyección de demanda empleada correspondió a la determinada en el mes de noviembre de 2007. (UPME, 2008)

Los resultados para ambos casos recomiendan la evaluación seria de la alternativa eólica, a fin de flexibilizar la operación y mejorar la disponibilidad de recursos energéticos como el gas natural en otros sectores.

Ver Tabla 3. Nótese que los supuestos de incorporación de energía eólica para las sensibilidades efectuadas alcanzan los 1200MW-1400MW para el período de estudio. El análisis realizado es muy preliminar, pero el hecho de que el ente planeador del sector eléctrico piense al menos en incluir el recurso eólico resulta motivante para los investigadores que trabajan el tema y los ambientalistas. Procedimientos más completos para estudiar el asunto de la penetración eólica en Colombia pueden basarse en estudios como (CIGRE, 2006, CIGRE, 2008)

Tabla 3. Capacidad Eólica requerida según estudios de UPME 2008-2022. Contempla escenarios de combinación con recursos carboníferos e hídricos. Adaptado (UPME, 2008).

Nueva Capacidad Eólica Requerida (Demanda Alta hasta 2013 – Media hasta 2022)		
	Caso 1 Eólica + Carbón	Caso 2 Eólica + Hidroeléctrica
2012	150MW	250MW
2013	150MW	250MW
2019	400MW	400MW
2020	500MW	500MW

A manera de conclusión, la precariedad en el desarrollo del recurso eólico en Colombia, el alto potencial que se tiene y las perspectivas futuras de interconexión con países como los centroamericanos, las islas del caribe, e incluso con la florida, motivan de manera contundente la realización de estudios a todos los niveles:

técnicos, investigativos, económicos, de armonización regulatoria, etc...

Actualmente, en la Universidad Pontificia Bolivariana se vienen adelantando importantes desarrollos a nivel doctoral en el tema de la energía eólica, tratando de responder interrogantes como los planteados en los estudios de E.ON Netz para el caso Alemán, pero buscando evaluar y brindar soluciones a los problemas técnicos asociados con altos escenarios de penetración eólica en Colombia (Isaac, 2008).

5.5. Retos tecnológicos que representa la implantación de la Energía Eólica en Colombia.

Pensar en la implantación masiva de la energía eólica en Colombia supone un sinnúmero de interrogantes de tipo técnico. A continuación se presentan algunas reflexiones que los autores del presente trabajo han realizado en referencia a este aspecto.

- *Cuáles son los aerogeneradores más adecuados para el caso Colombiano?*

En la actualidad, es claro que la tendencia mundial prácticamente apunta a seleccionar entre los generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) y los generadores directamente acoplados (Gearless). En los dos casos anteriores, se recomienda considerar turbinas de velocidad variable y con regulación del ángulo de paso (pitch control) (Manwell, 2002) y (Johnson, 2006).

Debe tenerse presente aspectos como la incidencia de los convertidores de estado sólido incluidos en los aerogeneradores en la calidad de la potencia, los requerimientos dinámicos en tensión y recuperación de la potencia activa, el *Voltage Ride Through*, y muchos otros aspectos mencionados en (CIGRE, 2007), que se analizaran en trabajos posteriores.

Finalmente, tropicalizar el aerogenerador es un imperativo. Las condiciones climáticas y medioambientales de zonas como la Guajira, donde está presente la contaminación salina y por polvo, los vientos huracanados en épocas del año,

las temperaturas extremas, entre otras, ameritan el empleo de factores de seguridad, derrateo y construcción especial.

- *Por motivos económicos, la repotenciación debe ser viable pero lejana.*

No tiene sentido amarrar tecnológicamente los diseños a un producto o fabricante que no garantice la posibilidad de repotenciar de manera práctica los parques eólicos a construir.

Aunque los costos de la generación eólica hoy en día son claramente identificables y presentan una tendencia decididamente a la baja (Milligan, 2000) (Denny, 2007); dada la escasez de recursos económicos de un país en vía de desarrollo como Colombia, deben efectuarse diseños que permitan la selección de los niveles de tensión y capacidades de los aerogeneradores, de tal forma que la previsión en la satisfacción de la demanda abarque períodos más largos de lo normal, de tal forma que la repotenciación sea la última opción.

- *Diseñar la infraestructura de generación y transmisión pensando en las interconexiones internacionales.*

La coyuntura política actual parece no favorecer la integración eléctrica de Colombia con sus vecinos cercanos, sin embargo a futuro será inevitable pensar en la “Aldea Energética Global” donde las interconexiones internacionales ayudarán a mejorar la complementariedad de los países y su competitividad.

En cuanto al aspecto tecnológico, tendrán necesariamente que explorarse las opciones que mayor pertinencia ofrezcan a la hora de conectar la generación eólica al sistema de transmisión. Estrategias como el uso de transmisión en corriente directa (HVdc), en el caso de interconexiones submarinas y de gran longitud, así como equipos FACTS deben tenerse en cuenta. (A. Skytt, 2001). Sin embargo, debe evaluarse previamente y con detalle la interacción

entre los sistemas de cd y los parques eólicos, porque casos de oscilaciones electromecánicas pueden tener lugar (Abad, 2008) (Yazdani, 2006).

6. CONCLUSIONES

Colombia carece de un marco regulatorio que favorezca la institución y crecimiento de centrales de energía eólica; faltan incentivos tributarios y garantías legales para la remuneración, así como políticas gubernamentales claras, que brinden las señales necesarias.

El nivel tecnológico actual, la total dependencia de fabricantes extranjeros y la escasa experiencia operativa y de ingeniería en el campo de las centrales eólicas, aumenta indiscutiblemente los costos de construcción, operación y mantenimiento. Esto se constituye en una gran oportunidad para realizar desarrollos propios, aplicar la ingeniería inversa y propender por la manufactura local de la infraestructura y componentes asociados con la industria eólica.

El alto potencial que se tiene en el recurso eólico y las perspectivas futuras de interconexión con países como los centroamericanos, las islas del caribe, e incluso con la florida, motivan de manera contundente la realización de estudios a todos los niveles: técnicos, investigativos, económicos, de armonización regulatoria, etc...

A diferencia de Alemania, Colombia tiene la mayor parte del recurso eólico (o por lo menos el más fácilmente explotable) concentrado en zonas de difícil acceso y conectado a sistemas eléctricos marcadamente radiales. Los estudios de diseño e implementación de refuerzos a la red se hacen necesarios, en aras de garantizar robustez y buen desempeño del sistema.

REFERENCIAS

- A. SKYTT, E. A. (2001) HVDC Light for Connection of Wind Farms. IN TECHNOLOGY, R. I. O. (Ed. *Proceedings of the Second International Workshop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms*. Estocolmo, Royal Institute of Technology.
- ABAD, G. (2008) Two-Level VSC-Based Predictive Direct Power Control of the Doubly Fed Induction Machine with Reduced Power Ripple at Low Constant Switching Frequency. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23.

- ACKERMANN, T. (2005) *Wind Power in Power Systems*, Estocolmo.
- ALEMANIA, M. F. D. M. A. P. D. L. N. Y. S. N. D. (2007) Informe de Experiencias 2007 sobre la Ley de Energías Renovables - LER. (Borrador). IN ALEMANIA, M. F. D. M. A. P. D. L. N. Y. S. N. D. (Ed. Berlin.
- AWEA (2008) American Wind Energy Association.
- BACHMANN, U. (1999) Analysis of Inter-area Oscillations in the European Electric Power System in Synchronous Parallel Operation with the Central-European Networks. IN IEEE (Ed. *IEEE Power Tech 9 Conference*. Budapest, IEEE.
- BIECHL, H. (2007) Wind Energy in Germany- History, Current State and Future. *Feria Internacional del Sector Eléctrico Colombiano -FISE-*. Medellin.
- BREULMANN, H. (2000) Analysis and Damping of Inter-area Oscillations in the UCTE-CENTREL Power System. IN CIGRE (Ed. *CIGRE Conference 2000*. Paris, CIGRE.
- CIGRE (2006) CIGRE 293. Electric Power System Planning with the uncertainty of Wind Generation. . IN CIGRE (Ed. Paris, CIGRE WG C1.3.
- CIGRE (2007) CIGRE 328. Modeling and dynamic behavior of Wind Generation as it relates to power system control and dynamic performance. Paris, CIGRE WG C4.601.
- CIGRE (2008) CIGRE 357. Managing the complexity and uncertainties of load, generation and markets in system development planning. IN CIGRE (Ed. Paris, CIGRE WG C1.7.
- DENNY, E. (2007) Quantifying the total net benefits of grid integrated wind. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22.
- DEWI , E. O. N., EWI, RWE TRANSPORT GRID, VE TRANSMISSION (2005) Planning of the Grid Integration of Wind Energy in Germany Onshore and Offshore up to the year 2020. Colonia.
- E.ON (2003) Grid Code High and Extra High Voltage. E.ON Netz GmbH.
- EIA (2008) Energy Information Administration
- EL-ARROUDI, K. (2007) Severity Index for Estimating the Impact of Wind Generation on System Vulnerability. *IEEE Proceedings*. IEEE.
- ESTANQUEIRO, A. I. (2007) Barriers (and Solutions...) to Very High Wind Penetration in Power Systems. IN IEEE (Ed. *IEEE Proceedings*. IEEE.
- EU (2005) Oficial Journal or European Union. . *Oficial Journal or European Union*. . European Union.
- EWEA (2008) European Wind Energy Association.
- GENI (2008) Global Energy Network Institute.
- GRIJALVA, S. (2007) Large scale integration of wind generation including network temporal security analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22.
- GWEC (2008) Global Wind Energy Outlook 2008. Global Wind Energy Council.
- HAN, C. (2008) STATCOM Impact Study on the Integration of a Large Wind Farm into a Weak Loop Power System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23.
- HANSEN, L. H. (2001) *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*, Roskilde, Dinamarca, Risø National Laboratory.
- ISAAC, I. (2007) Wind Power State of Art and Possibilitities in Colombia (Conferencia) Jornada Técnica Ingeniería Eléctrica. Universidad Pontificia Bolivariana.
- ISAAC, I. (2008) Wind Energy in Colombia. Looking for a Research Problem. *First International Colloquium Electric Energy Systems and Mechatronics*. Medellin, Universidad Pontificia Bolivariana.
- ISSET (2008) Research Alpha Ventus (RAVE). Kassel, Institut für Solare Energieversorgungstechnik.
- JACOBS, M. (2007) Transmission Recommendations for High Wind Penetration. *IEEE Proceedings*. IEEE.
- JOHNSON, G. (2006) *Wind Energy Systems*, Manhattan, USA.
- LUO, C. (2007) Estimation of Wind Penetration as Limited by Frequency Deviation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22.

- MANWELL, J. F. (2002) *Wind Energy Explained*, Amherst, USA, John Wiley and Sons.
- MARTINEZ, H. (2007) Panorama Energético de Colombia. (Conferencia Jornada Técnica Ingeniería Eléctrica). Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana.
- MATEVOSYAN, J. (2006) Wind Power Integration in Power Systems With Transmission Bottlenecks. Estocolmo, Royal Institute of Technology.
- MILLIGAN, M. (2000) NREL/TP-500-27514. Modeling Utility-Scale Wind Power Plants Part 1: Economics. National Renewable Energy Laboratory.
- MOLLY, J. P. (2008) Ermittlung der deutschen Wertschöpfung im weltweiten Windenergiemarkt für 2007. DEWI.
- RIBRANT, J. (2007) Survey of failures in wind power systems with focus on swedish wind power plants during 1997-2005. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22.
- RODRIGUEZ, L. (2004) Programa General Para el Desarrollo de la Energía Eólica en Colombia. *Letras Juridicas*, 9.
- RODRIGUEZ, L. (2008) Energía Eólica en Colombia. Experiencia de Empresas Públicas de Medellín. *Primera Wind Expo LAWEA*. Mexico.
- ROSAS, P. (2003) Dynamic Influence of Wind Power in Power Systems. Impact of wind Energy in a Future Power Grid. Copenhagen, Technical University of Denmark.
- SOENS, J. (2005) Impact of wind Energy in a Future Power Grid. Leuven, Belgica, Katholieke Universiteit Leuven.
- UPME (2006a) Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia. 1 ed. Bogota, Unidad De Planeación Minero Energética de Colombia.
- UPME (2006b) Plan Energético Nacional Contexto y Estrategias 2006-2025. Bogota, Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia.
- UPME (2008) Plan Nacional de Expansión de Generación y Transmisión de Referencia 2008-2020. Bogota, Unidad De Planeación Minero Energética de Colombia.
- URIBE, A. (2008) *El Colombiano Agosto 25*. Medellín.
- WORLDWATCH-INSTITUTE (2008) Renewables 2007 Global Status report. IN INSTITUTE, W. (Ed. *Renewable energy policy network for the 21st Century -REN 21-*. Paris, Worldwatch Institute.
- YAZDANI, A. (2006) A Unified Dynamic Model and Control for the Voltage-Source Converter Under Unbalanced Grid Conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21.

SOBRE LOS AUTORES

Idi Amín Isaac

Ingeniero Electricista y MSc en 2000 y 2005 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asociado de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 2000. Actualmente adelanta sus estudios de PhD en UPB con la asesoría de Univ. of Kempten, Alemania. Ha trabajado en múltiples proyectos industriales.

Helmuth Biechl

Ingeniero Electricista. Doctor en Ingeniería. Trabajó en el área de planeación de sistemas eléctricos en E.ON Netz. Actualmente se desempeña como Jefe de Laboratorio de Máquinas Eléctricas y Automatización en la Univ. de Kempten, Alemania.

Es Director del Grupo de Investigación en Sistemas eléctricos y Mecatrónica -EESM- en convenio con la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Participa como director de trabajos doctorales en la temática de energía eólica y sistemas eléctricos de transporte masivo.

Jorge W. Gonzalez

Ingeniero Electricista de la Univ. Nacional en 1992 y MSc - PhD. en 2003 y 2006 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 1997. Trabajó ocho años para HMV Ingenieros. Ha trabajado para Siemens, Erlangen en la sección PTD (FACTS y HVDC). Es investigador invitado del Werner von Siemens laboratory en Univ. Kempten, Alemania y en el Power Systems Institute en Erlangen Univ. Alemania.