



TESIS DE GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE LA
ENERGÍA EÓLICA EN LA ARGENTINA Y EL
MUNDO**

Autor: Alejandro C. Ayestarán

Tutor: Ricardo Lauretta

Instituto Tecnológico de Buenos Aires

Av. Eduardo Madero 399 – C1106AD Buenos Aires - Argentina

Mayo 2005

Resumen

En el presente trabajo se examina la problemática del abastecimiento energético mundial en los próximos cincuenta años y el rol que deben cumplir las fuentes de energía renovables en un escenario de desarrollo sustentable. Se detalla el caso de la energía eólica, haciendo referencia a aspectos tecnológicos, económicos, de mercado, políticos, sociales y ambientales, tanto en su desarrollo histórico como en las perspectivas de sus aplicaciones futuras. Se particulariza este mismo análisis al caso de la Argentina. Finalmente, en el anexo se presenta un resumen de los proyectos relacionados con estos temas que están siendo llevados a cabo en el ITBA.

Palabras clave: Energía Eólica, Desarrollo Sustentable, Energías Renovables.

Abstract

In this work, the issues regarding the world's energy supply in the next fifty years are examined, as well as the role that must be played by renewable energy sources in a sustainable development scenario. The case of wind energy is analysed in detail, referring to technological, economical, market, political, social and environmental aspects, both in its historical development as well as in the prospects of future applications. This same analysis is done for Argentina in particular. Finally, a summary of the projects related to these topics that are being carried out at ITBA is presented in the annex.

Keywords: Wind Energy, Sustainable Development, Renewable Energies.

ÍNDICE

Resumen	iii
Abstract	iii
1. Introducción	1
2. Desarrollo sustentable	3
2.1. Demanda de energía hasta el año 2050.....	3
2.2. El rol de los combustibles fósiles en la matriz energética actual	5
2.3. Alternativas a los combustibles fósiles	8
3. Una opción sustentable	11
3.1. Las energías renovables	11
3.2. La energía eólica, un caso exitoso.	12
3.2.1. Aspectos generales y tecnológicos	14
3.2.2. Mercado	16
3.2.3. <i>Level the playing field</i> (igualdad de condiciones).....	20
3.2.4. El papel de la investigación y desarrollo.	23
3.2.4.1. Penetración en las redes.....	24
3.2.4.2. Impactos ambientales.....	24
3.3. Aplicaciones aisladas, sistemas híbridos y generación distribuida	26
3.4. El uso de hidrógeno como vector energético y su relación con la energía eólica.	27
3.5. Perspectivas para Argentina.....	28
4. Discusión y conclusiones	31
4.1. Recomendaciones finales.....	31
5. Referencias	33
Anexo – Trabajos en energía eólica e hidrógeno en el ITBA	39
A.1. Proyecto micro aerogenerador.....	41
A.1.1. Resumen	41
A.1.2. Proceso general de diseño	41
A.1.3. Análisis de factibilidad y determinación de los lineamientos generales del proyecto.....	42
A.1.3.1. Localización	43
A.1.3.2. Estructura de soporte.....	43
A.1.3.3. Sistema de control	43
A.1.4. Ensayos preliminares	44
A.1.4.1. Anemometría (estudio de la velocidad del viento).....	44
A.1.4.2. Ensayo del generador eléctrico.....	46
A.1.5. Diseño mecánico	47
A.1.5.1. Hélice	47

A.1.5.2. Aspas	48
A.1.5.3. Partes mecánicas	49
A.1.5.4. Sistema de control.....	49
A.1.5.5. Estructura	51
A.1.6. Sistema de adquisición de datos.....	52
A.1.7. Mediciones.....	53
A.1.8. Conclusiones	56
A.1.9. Proyección del trabajo.....	57
A.1.10. Bibliografía	57
A.2. Proyecto micro aerogenerador. Evolución I.....	60
A.2.1. Introducción	60
A.2.2. Desarrollo.....	61
A.2.2.1. Sistema de adquisición de datos	61
A.2.2.1.1. Velocidad y dirección del viento.....	62
A.2.2.1.2. Orientación del aerogenerador respecto al viento	62
A.2.2.1.3. Potencia activa instantánea generada	62
A.2.2.1.4. Ángulo de inclinación del sistema de control	63
A.2.2.1.5. Velocidad de giro de la hélice	63
A.2.2.1.6. Frecuencia de vibración de la torre	63
A.2.2.1.7. Discusión	64
A.2.2.1.8. Conclusiones	64
A.2.2.2. Rediseño mecánico	65
A.2.2.2.1. Conclusiones	67
A.2.2.3. Modelado de las aspas.....	67
A.2.2.4 Ensayo del generador eléctrico	68
A.2.2.4.1 Conclusiones	69
A.2.3. Conclusiones	69
A.2.4. Referencias	70
A.2.5. Apéndice – Esquemas de las placas de adquisición de datos	71
A.3. Producción y almacenamiento de hidrógeno.....	73
A.3.1. Resumen.....	73
A.4. Fotografías del aerogenerador y el electrolizador	74

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el desarrollo de las sociedades ha estado estrechamente ligado al consumo de energía. Hasta hace poco más de dos siglos, la humanidad había sabido satisfacer sus necesidades energéticas mediante fuentes renovables. Sólo desde la Revolución Industrial se han ido incorporando los combustibles fósiles (primero el carbón, luego el petróleo y más recientemente el gas) a la matriz energética mundial, hecho que ha permitido un desarrollo sin precedentes, pero que plantea serios interrogantes de cara al futuro.

El presente trabajo tiene como objetivo demostrar que la única alternativa viable para permitir un desarrollo humano sustentable en el largo plazo, es mediante la transición hacia un sistema energético mundial basado en el uso de las fuentes renovables de energía.

A tal efecto, se desarrolla el caso de la energía eólica, que está demostrando ser actualmente una alternativa real, y que puede servir como modelo para el posterior desarrollo de las restantes fuentes renovables de energía.

Las ideas surgidas de este trabajo no pretenden ser estimaciones o proyecciones futuras, más bien la intención es plantear un posible camino de desarrollo energético, cuya concreción estará sujeta a decisiones políticas y de otras índoles, tanto a nivel global como regional y local.

Los horizontes temporales analizados son el corto (próximos cinco años), mediano (años 2010 a 2020) y largo plazo (años 2020 a 2050), tanto para el mundo como para la Argentina en particular.

Finalmente, los conceptos aquí tratados pretenden ser una marco conceptual para los trabajos que el ITBA lleva adelante en estos temas, los cuales son presentados en forma resumida en el Anexo.

2. DESARROLLO SUSTENTABLE

La definición más comúnmente aceptada de desarrollo sustentable (o sostenible) es¹:

"Es el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas."

La energía, así como el desarrollo económico y social, la educación, la alimentación, la salud, el ambiente, son algunos de los aspectos más importantes cuando se estudia la sustentabilidad de los procesos de desarrollo humano.

La energía, en particular, está estrechamente ligada a todos los aspectos antes mencionados. Se requiere energía para posibilitar el desarrollo de las sociedades y mejorar su calidad de vida. Sin embargo, es mandatorio éticamente que esto se lleve a cabo de manera sustentable.

"El modo en el cual la energía moderna es suministrada a todas las personas en el mundo es la mayor oportunidad de la humanidad para establecer un sistema ambientalmente sostenible." [1]

2.1. Demanda de energía hasta el año 2050

En la literatura mayormente se acepta, dentro de las incertidumbres asociadas a las estimaciones, que la demanda mundial de energía continuará creciendo exponencialmente en los próximos 45 años. Las estimaciones de las distintas agencias internacionales prevén un incremento desde el 100 hasta el 300% para el año 2050. Este incremento tendrá lugar principalmente en los países en desarrollo (entre 60 y 80%). [2,3,4]

Como ejemplo del impacto que tendrá la demanda de energía en países en desarrollo es el hecho que el 40% del incremento en el consumo de energía en el mundo entre los años 2000 y 2003 tuvo lugar en China.

La demanda de energía puede ser mejor estimada desagregándola en 3 componentes, según la ecuación (1):

$$\text{Demanda de Energía (kW)} = \text{Población (N)} * \text{Desarrollo Económico (PBI / N)} * \text{Intensidad de Energía (kW / PBI)} \quad (1)$$

1 Cita del Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Comisión Brundtland): Nuestro Futuro Común (Oxford: Oxford University Press, 1987).

El consumo energético está dado entonces por el crecimiento poblacional y económico, afectado por variaciones en la intensidad en el uso de la energía.

La figura 1 muestra las proyecciones de población y desarrollo económico.

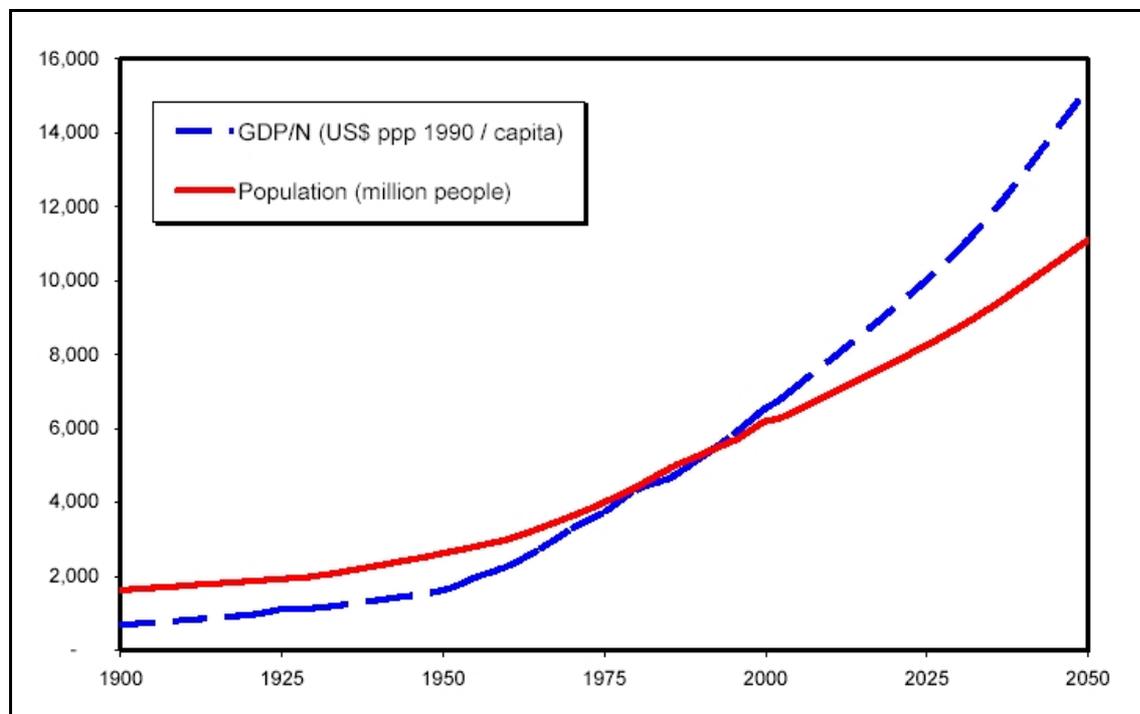


Figura 1. Crecimiento poblacional y desarrollo económico mundiales².

No es esperable que mejoras en el uso eficiente de la energía tengan un impacto significativo en la disminución del consumo de energía, dado que esto sucede típicamente en los países plenamente desarrollados. La figura 2 muestra cómo se *desacoplan* el consumo energético específico y el desarrollo económico sólo cuando este último alcanza valores propios de las naciones del primer mundo.

² Fuentes: International Energy Agency "World Energy Outlook", 2003. Energy Information Administration "International Energy Outlook", 2004.

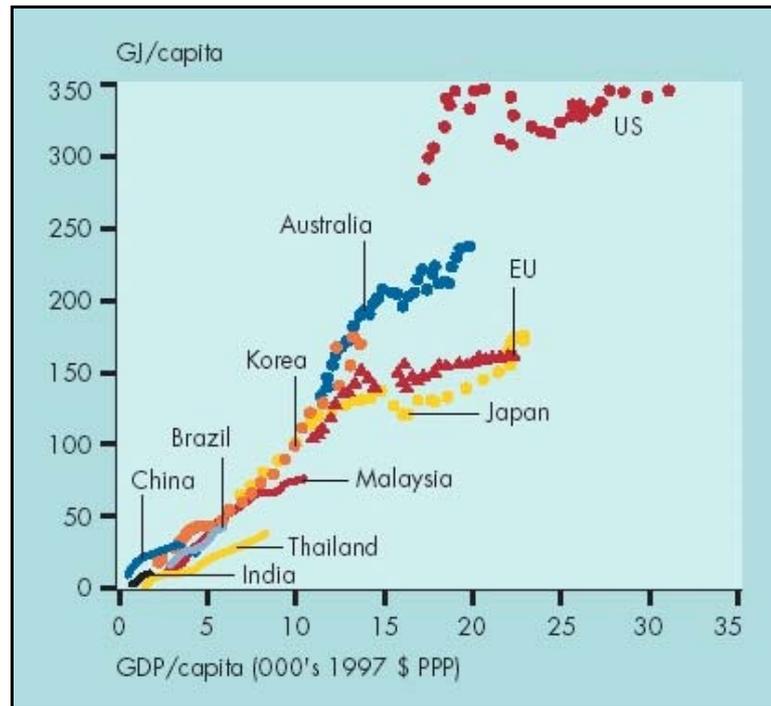


Figura 2. Consumo energético per cápita en función del desarrollo económico para diversos países³.

La atención se centra entonces en cómo abastecer esta demanda creciente de energía de una manera sustentable.

2.2. El rol de los combustibles fósiles en la matriz energética actual

Los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) proveen actualmente casi el 90% de la energía primaria consumida en el mundo (figura 3).

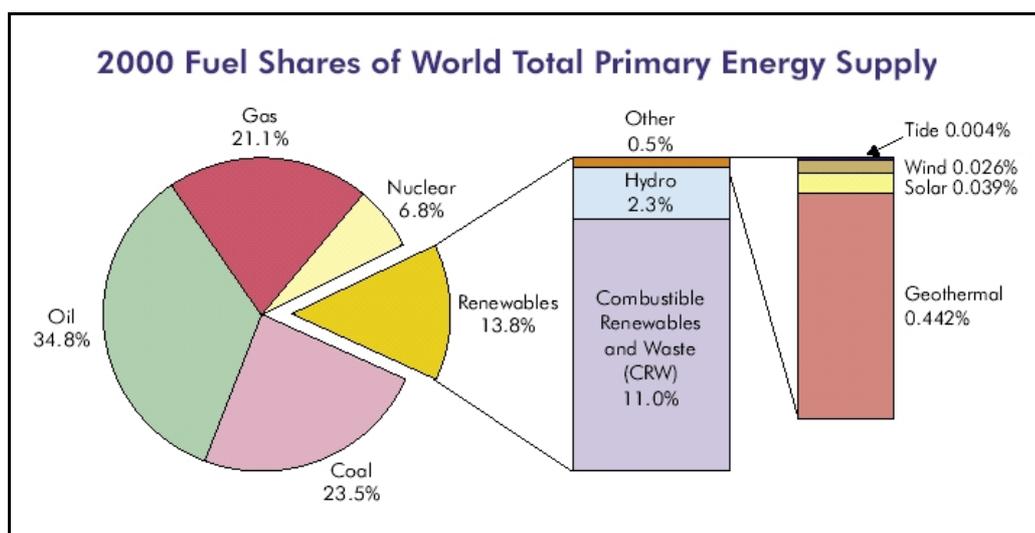


Figura 3. Matriz energética mundial actual⁴.

³ Fuentes: International Monetary Fund, British Petroleum.

Existen tres motivos igualmente importantes asociados al consumo de estos combustibles que han llevado recientemente a los países desarrollados a replantear sus estrategias y políticas energéticas, a saber:

- Estos combustibles son no renovables, es decir, las reservas son finitas y se están agotando rápidamente.
- Generan preocupación en términos de su abastecimiento, tanto por consideraciones geográficas como políticas y sociales.
- Son fuente de contaminación ambiental y principal causa del calentamiento global antropogénico, debido a la emisión de gases de efecto invernadero (mayormente CO₂) producto de la combustión.

Está fuera del alcance del presente trabajo hacer un análisis pormenorizado sobre el abastecimiento futuro de los combustibles fósiles en el mundo. Sin embargo, el consenso internacional indica que la producción de petróleo y gas llegará a su pico en los próximos 20 y 40 años, respectivamente. [5]

La figura 4 muestra como ya se ha alcanzado este máximo de producción para el petróleo en los países no pertenecientes a la OPEP ni a la ex-Unión Soviética.

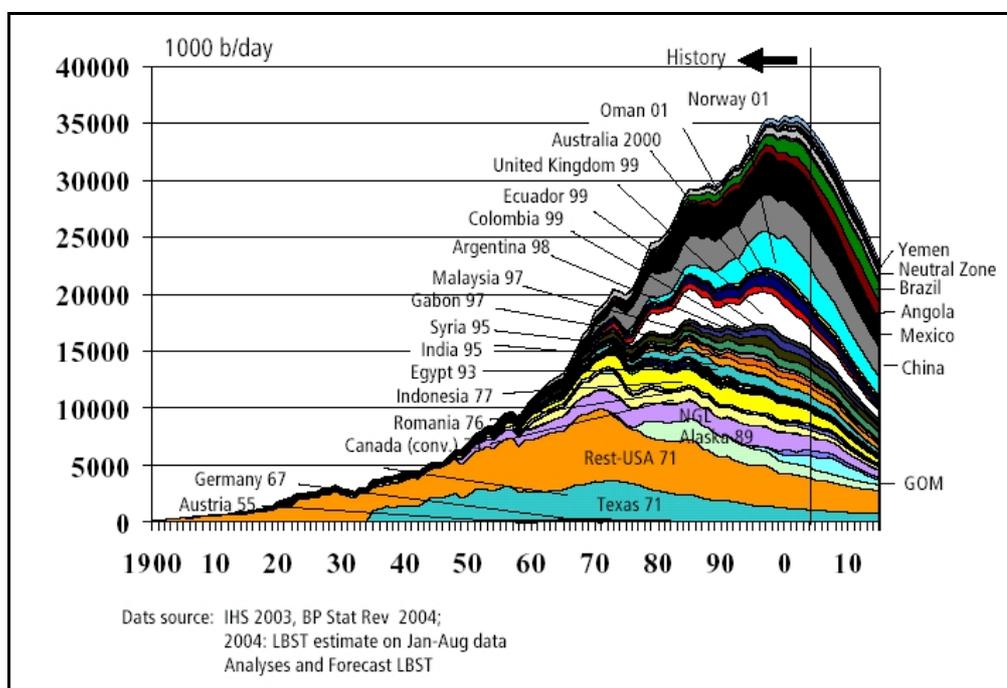


Figura 4. Producción de petróleo en los países fuera de la OPEP y la ex-Unión Soviética.

⁴ Fuente: International Energy Agency.

Respecto de las reservas existentes en el mundo (tanto de petróleo como de gas) vale decir que más del 70% se encuentran en Medio Oriente.

La Unión Europea estima que si continúan las tendencias actuales (es decir, si no se toman medidas correctivas) el 70% de la energía que consuman será importada. [6]

Ya no existen dudas sobre la relación causal entre el calentamiento global y el aumento en la concentración de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (ver figura 5). Hasta hace algunos años, la duda residía en saber si el aumento en las concentraciones de GEI era natural, antropogénico o una combinación de ambos. Actualmente se acepta que existe una contribución significativa y determinante al aumento en los niveles de concentraciones producido por la actividad humana desde la era pre-industrial, acelerándose en los últimos años.[7]

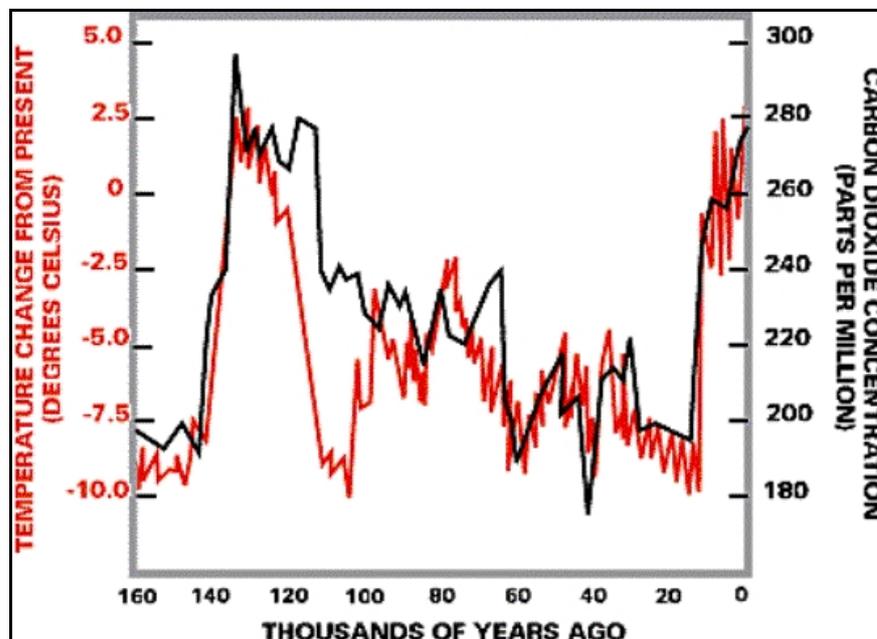


Figura 5. Correlación entre las variaciones de temperatura y la concentración de CO₂.⁵

Finalmente, existen causas adicionales de preocupación para los países en desarrollo en términos de su abastecimiento energético. Por ejemplo: la falta de acceso a fuentes comerciales de energía (p. ej. electricidad) para grandes porcentajes de la población (ver figura 6); la ya mencionada creciente demanda, la necesidad de usar recursos locales, falta de infraestructura y posibilidades de financiamiento, entre otras.

⁵ Fuente: The University of Michigan's Global Change Curriculum.

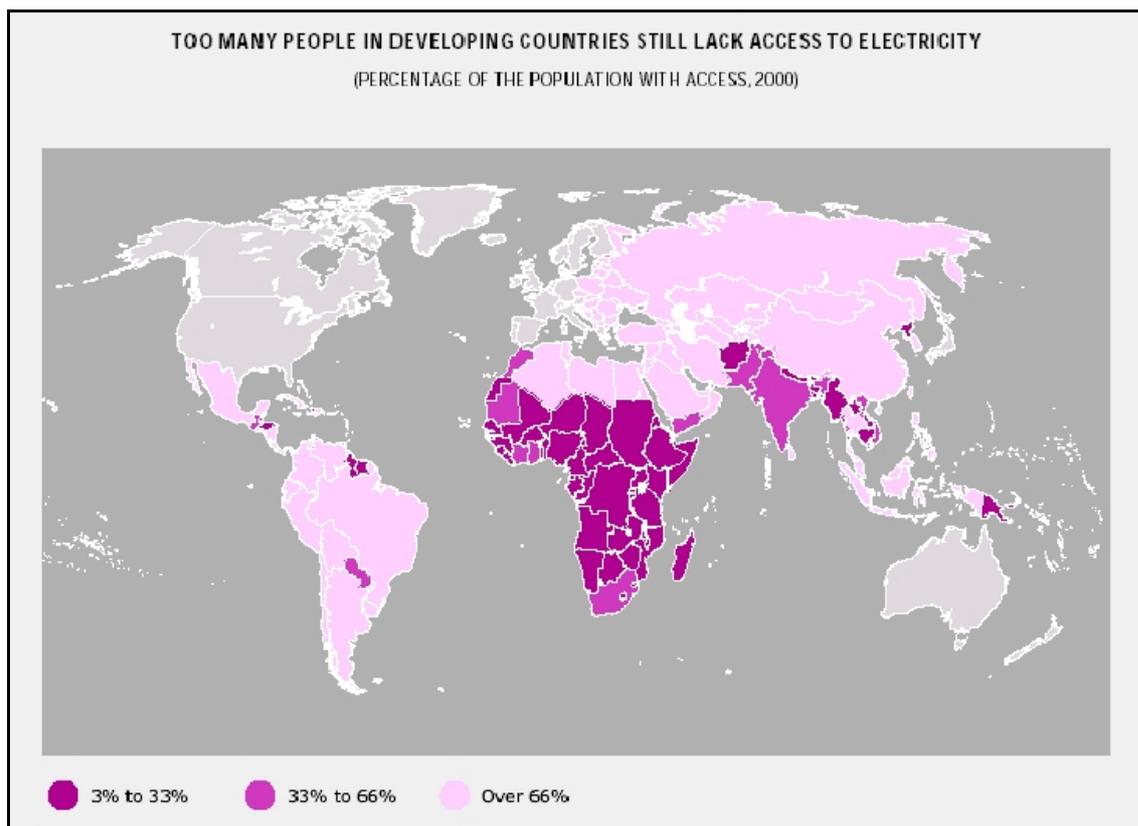


Figura 6. Acceso a la electricidad en el mundo⁶.

2.3. Alternativas a los combustibles fósiles

Las siguientes *no* son alternativas viables a los combustibles fósiles en términos económicos, tecnológicos, sociales, políticos y ambientales:

- Energía hidroeléctrica (grandes centrales convencionales): Actualmente proveen el 2,5% de la energía mundial. El potencial técnico es tan sólo 3 o 4 veces la capacidad instalada hoy. Por otra parte, este potencial se encuentra principalmente en los países en desarrollo y requiere de grandes inversiones de capital para su aprovechamiento, además de los impactos ambientales (disrupción de microclimas y ecosistemas) y sociales (relocación de poblaciones, cambios locales en la agricultura) que genera.
- Energía nuclear (fisión): Al ritmo presente de consumo de uranio, se estima el pico de producción en 25 años. Tiene cada vez menos apoyo de la opinión pública y los gobiernos. Se decomisionan más plantas de las que se instalan. Si bien los impactos ambientales en términos de emisiones son bajos, no está resuelto el problema del confinamiento de

⁶ Fuente: World Bank.

los residuos. La proliferación nuclear para usos militares es una preocupación para los países centrales. Los costos de instalación para nuevas plantas son altos.

- Energía nuclear (fusión): Dentro del horizonte que se analiza en el presente trabajo (e.g. hasta 2050) no se prevé que participen en modo alguno a la provisión mundial de energía. El proyecto de investigación más importante en fusión (el ITER) estima en un escenario optimista que para cerca de 2050 el primer prototipo no comercial viable para generación de electricidad a partir de fusión estará operacional. Cabe destacar además que presenta diversas barreras ambientales propias, entre ellas la generación de residuos radiactivos al igual que la fisión convencional⁷.

La única alternativa para empezar a constituir una matriz energética mundial segura, diversa, económicamente viable y ambientalmente compatible; es decir, sustentable, es mediante el desarrollo de las energías renovables.

⁷ Esto es debido a que las reacciones de fusión utilizadas liberan neutrones.

3. UNA OPCIÓN SUSTENTABLE

3.1. Las energías renovables

Las fuentes de energía renovables, a saber: eólica, solar (térmica y fotovoltaica), hidráulica⁸, biomasa⁹, geotermal y mareomotriz, tienen ciertas características distintivas respecto de las fuentes convencionales de energía:

- Son abundantes, permitiendo abastecer varias veces la totalidad de la demanda energética proyectada.
- Están dispersas geográficamente (e.g. disponibilidad local en todos los países y regiones).
- El impacto ambiental producido durante todo el ciclo de vida es menor que para las fuentes convencionales.
- La diversidad de fuentes y las diferentes escalas de implementación permiten su aplicación a necesidades energéticas específicas y variadas, promoviendo la generación de empleo y desarrollo social en economías regionales y nacionales.

Actualmente la participación de las energías renovables en la provisión de energía y electricidad en el mundo es muy reducida. Algunas de las barreras que impiden o limitan su desarrollo son (tabla 1) [8]:

⁸ Actualmente cuando se hace referencia a la energía hidráulica como fuente renovable se excluyen las grandes centrales hidroeléctricas (que si bien es renovable, es considerada una fuente convencional de energía). La máxima potencia de un aprovechamiento hidráulico renovable es del orden de los 10 MW.

⁹ Al igual que para la energía hidráulica, aquí vale una aclaración. En la concepción actual de energía renovable (o *nuevas* energías renovables), generalmente se excluyen de la biomasa los residuos combustibles (residenciales e industriales).

Barreras	Ejemplos
de Mercado	Mercados pequeños, poco acceso a mercados internacionales, poca participación del sector privado.
Tecnológicas	Tecnologías inmaduras (I&D), pequeñas escalas, dificultades técnicas para su integración a existentes sistemas energéticos.
Información	Falta de información por parte de los consumidores.
Financieras	Inadecuados modelos de financiación, riesgos de inversión, falta de financiación.
Económicas	Altos costos, precios de la energía, impuestos, subsidios, externalidades.
de Capacidad	Falta de mano de obra calificada, falta de RRHH especializados.
Ambientales	Impactos visuales, compatibilidad con el uso de la tierra.
Políticas	Políticas energéticas desfavorables.

Tabla 1. Ejemplos de barreras que afectan el desarrollo de las energías renovables.

Distintos escenarios sobre el suministro energético a futuro estiman la participación de las energías renovables según las hipótesis utilizadas en casa modelo. Algunos escenarios optimistas, pero factibles, establecen que con suficiente impulso por parte de los gobiernos y de eliminarse o reducirse las principales barreras, las energías renovables podrían proveer el 50% de la demanda mundial para el año 2050 e inclusive para el 2040. [1,9,10]

Lo que hay que destacar es que el consenso internacional dado por los gobiernos, la ciencia, las empresas y el resto de los sectores involucrados con el planeamiento energético establece que *el desarrollo y crecimiento de las energías renovables son la única alternativa viable, factible y sustentable para el abastecimiento global en el largo plazo*. [2,3,6,9,11,12,13]

A continuación se analiza en detalle el caso de la energía eólica, cuyo desarrollo histórico y futuro constituyen en ejemplo exitoso en la consecución de este objetivo.

3.2. La energía eólica, un caso exitoso.

La energía eólica es la fuente de energía primaria (incluyendo fuentes convencionales) de más rápido crecimiento en el mundo en los últimos años, tendencia que se estima continuará por lo menos durante los próximos diez años, aún en los escenarios más conservadores¹⁰. La figura 7 muestra el crecimiento en la capacidad instalada en el período 1994-2004.

¹⁰ e.g. *Business-as-usual forecasts*, es decir, el crecimiento exponencial continuará aún sin la eliminación de las barreras actuales para su desarrollo.

La figura 8 muestra la potencia instalada en el mundo (anualmente y el total acumulado) desde la década de los ochenta, momento en que comenzó el desarrollo comercial de las turbinas eólicas modernas.

Este gran crecimiento relativo no ha tenido, hasta el momento, demasiada relevancia en términos absolutos (e.g. participación de la energía eólica en la producción global de energía). Sin embargo, como se explicará en las secciones siguientes, esto podría cambiar en el futuro próximo.

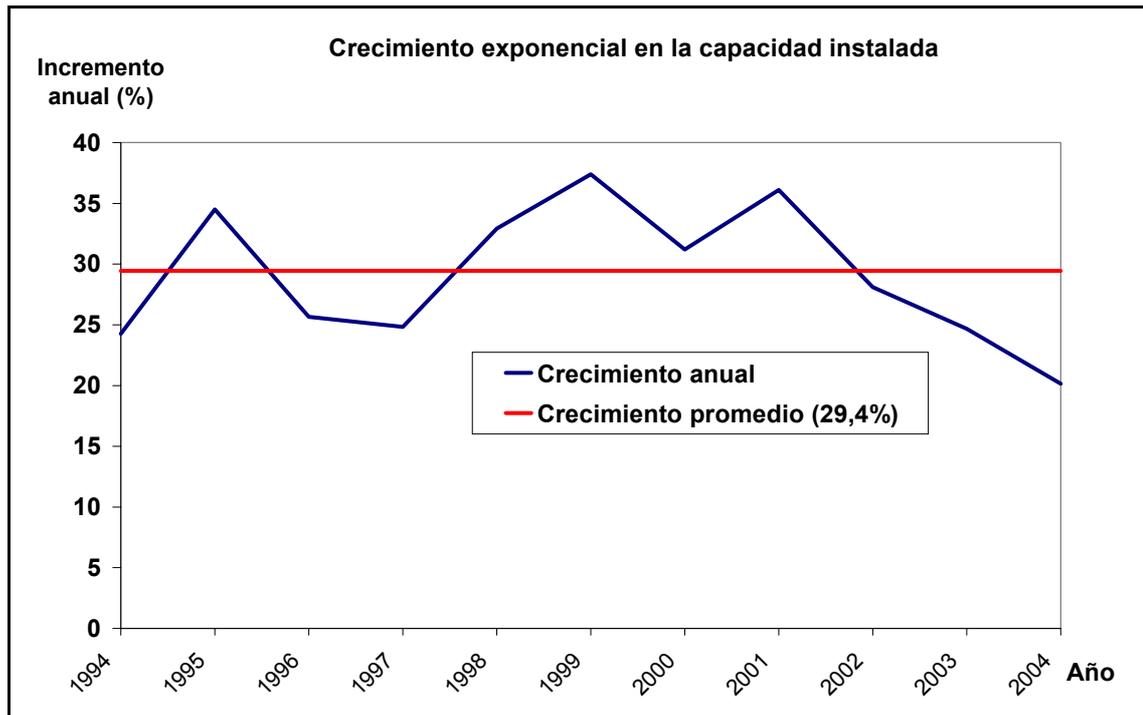


Figura 7. Crecimiento exponencial de la capacidad instalada en el período 1994-2004¹¹.

¹¹ Fuentes de figuras 7, 8, 10 y 11: BTM Consult, WWEA (World Wind Energy Association), AWEA (American Wind Energy Association), EWEA (European Wind Energy Association), BWE (German Wind Energy Association).

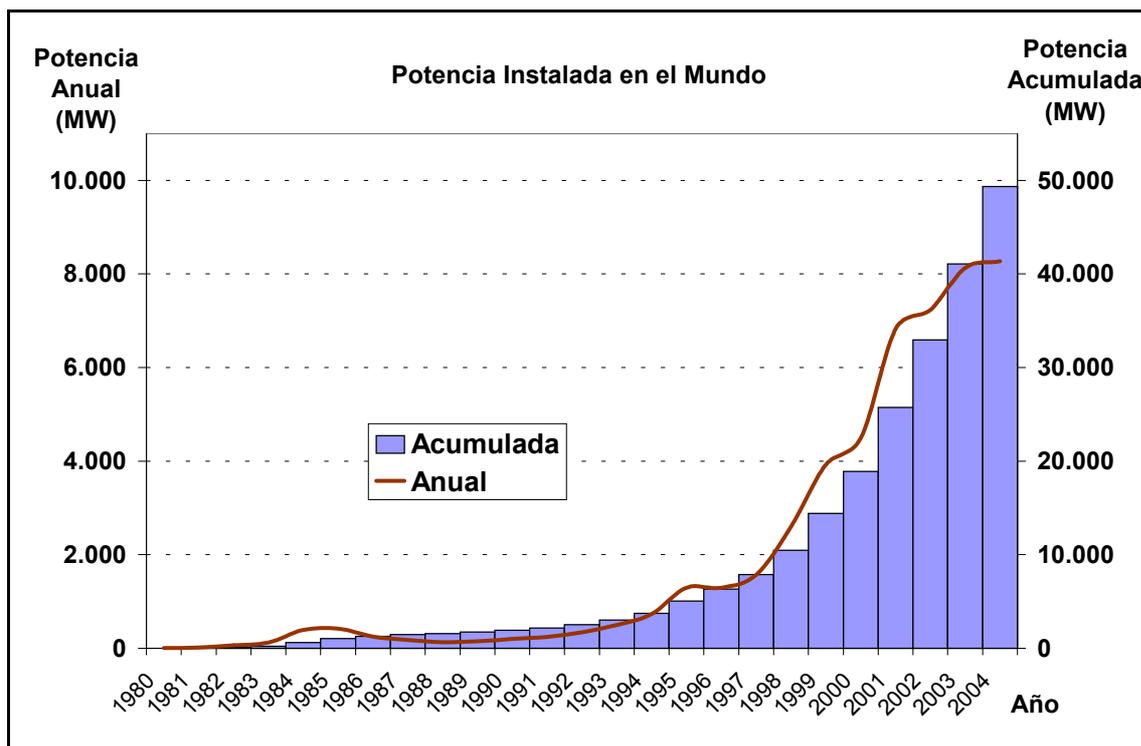


Figura 8. Potencia eólica instalada en el mundo.

3.2.1. Aspectos generales y tecnológicos

La energía eólica moderna tiene como objetivo directo la generación de electricidad, mediante equipos conocidos como turbinas eólicas o aerogeneradores.

La potencia nominal de una turbina varía desde algunas decenas de W, las más pequeñas, hasta varios MW, las más grandes actualmente¹² (la figura 9 muestra el aumento en el tamaño de las turbinas desde que comenzó su desarrollo). Esta tendencia se espera que continúe en los próximos años. Las aplicaciones son en consecuencia muy variadas. La interconexión de varias turbinas grandes para constituir granjas eólicas (con potencias comparables a las de las centrales convencionales de generación eléctrica) constituye actualmente el mayor porcentaje de la potencia instalada.

¹² Las turbinas comerciales más grandes a la fecha de presentación de este trabajo son de 5 MW.

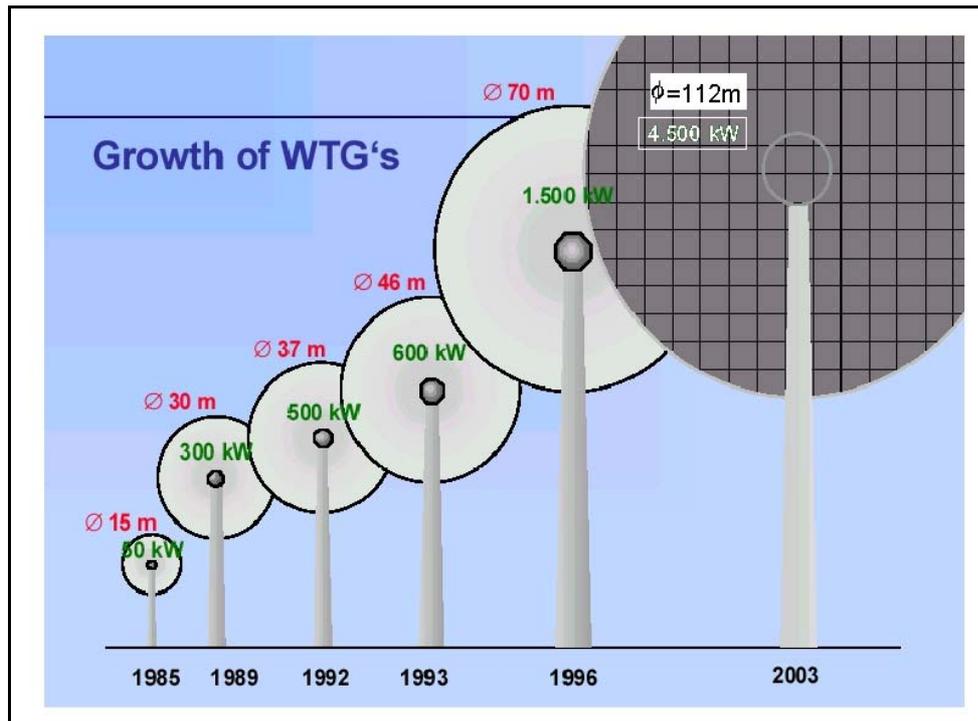


Figura 9. Aumento en el tamaño máximo de las turbinas eólicas¹³.

La estimación del recurso eólico constituye una parte fundamental del desarrollo de esta fuente de energía. En términos globales o regionales, la estimación permite conocer el potencial técnico que puede ser aprovechable. En términos locales, la medición de la velocidad del viento es requisito indispensable para poder situar las turbinas en los lugares más convenientes y estimar la energía anual producida.

El potencial técnico aprovechable, en base a estimaciones actuales conservadoras, es mayor que el consumo global de energía (y más del doble del consumo de electricidad proyectado del año 2020). El potencial *off-shore* europeo alcanza con creces para abastecer ese continente y el potencial estadounidense también alcanza a suplir toda la demanda de electricidad de ese país. [14,15]

Un estudio indica la factibilidad de proveer el 12% del consumo mundial de electricidad mediante energía eólica para el año 2020 [16]. Si bien esto puede parecer demasiado optimista (en términos de la tasa de crecimiento que implica), es perfectamente comparable con el desarrollo que experimentaron décadas atrás la energía hidroeléctrica y nuclear.

El análisis detallado de la tecnología de energía eólica constituiría por sí sólo un trabajo de investigación. Sin embargo, como referencia se presenta a

¹³ Fuente: BTM Consult.

continuación una lista (tabla 2) con los indicadores (tecnológicos y otros) más significativos para monitorear el avance en el desarrollo de la energía eólica.

Tipo	Indicadores (seleccionados)
de Investigación y Desarrollo	potencia máxima de turbina, diámetro máximo de rotor, altura de torre, tipo de generador eléctrico, tipo de transmisión, materiales de pala, tipos de torre.
de Performance	eficiencia, factor de carga, producción específica, disponibilidad técnica, vida útil, niveles sonoros.
de Costo	costo de manufactura por kWh, costo de producción off-shore, costos de turbinas, cost por m ² de área barrida, costos típicos de O&M, tiempos medios de repago de inversión, costos de decomisionamiento.
de Mercado e Industria	granja eólica más grande on-shore, granja eólica más grande off-shore, capacidad instalada por países, tasa de crecimiento anual, tamaño promedio de turbina, capacidad de producción anual, empleos en la industria, lead-times.

Tabla 2. Indicadores seleccionados para el desarrollo de la energía eólica¹⁴.

3.2.2. Mercado

En la actualidad, el mercado para la energía eólica está muy concentrado. Tan sólo 5 países representan casi el 80% de la potencia instalada y el 75% de esta se encuentra en Europa (figuras 10 y 11). Sin embargo, esto también demuestra el potencial de expansión que existe (es decir, además del crecimiento proyectado en los mercados actuales).

¹⁴ Fuente: European Wind Energy Association, EU Directorate General for Transport and Energy.

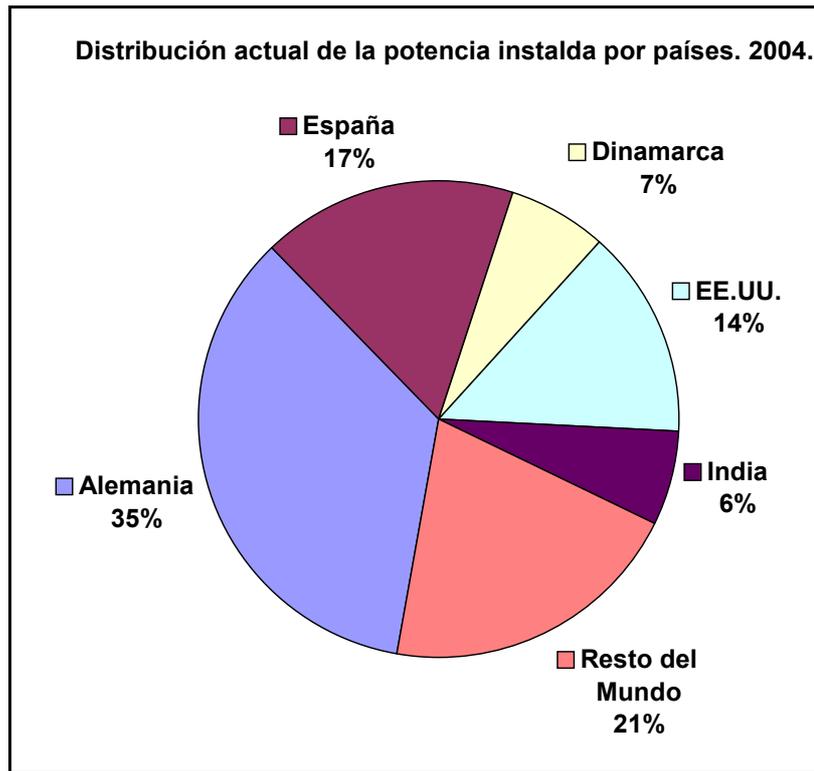


Figura 10. Distribución de la capacidad instalada por países.

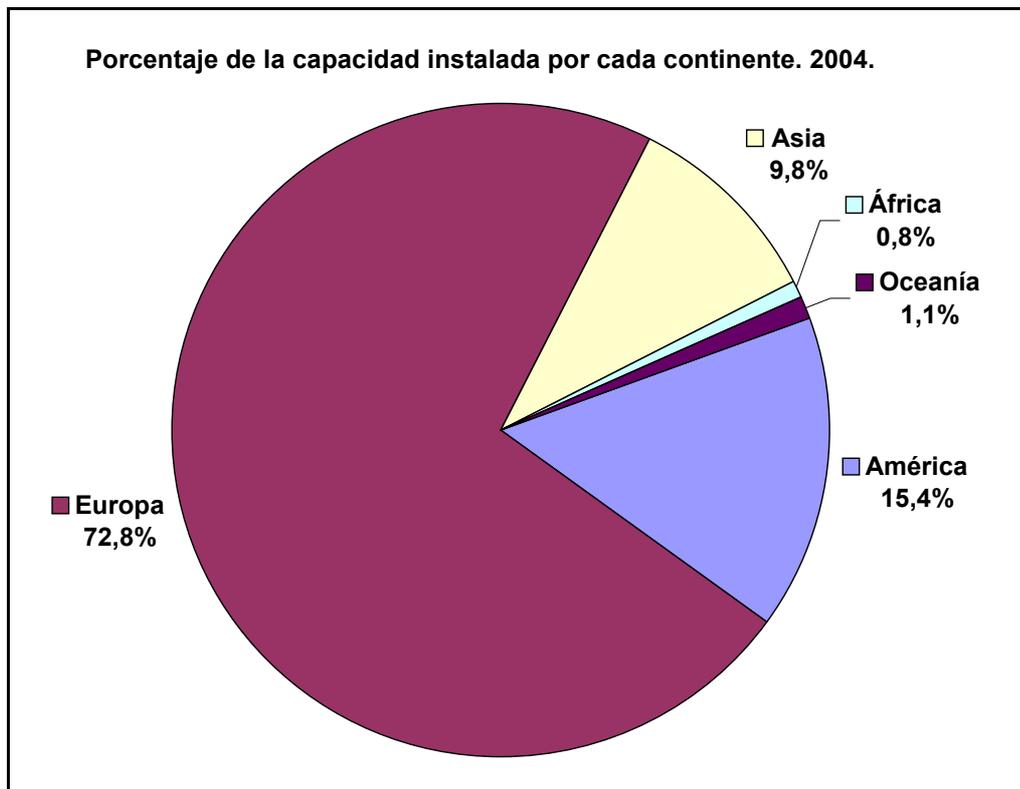


Figura 11. Distribución de la capacidad instalada por continente al año 2004.

Los costos de la energía eólica han disminuido significativamente a medida que se obtienen economías de escala por el aumento en el tamaño promedio de las

turbinas y en la capacidad instalada acumulada¹⁵. La figura 12 muestra el aumento en la potencia promedio de las turbinas instaladas en diversos países en los últimos años. Las figuras 13 y 14 indican la evolución histórica y proyectada de los costos de generación en EE.UU. y Dinamarca, respectivamente, sin incluir subsidios u otro tipo de incentivos fiscales (es decir, reflejan el costo técnico de generación).

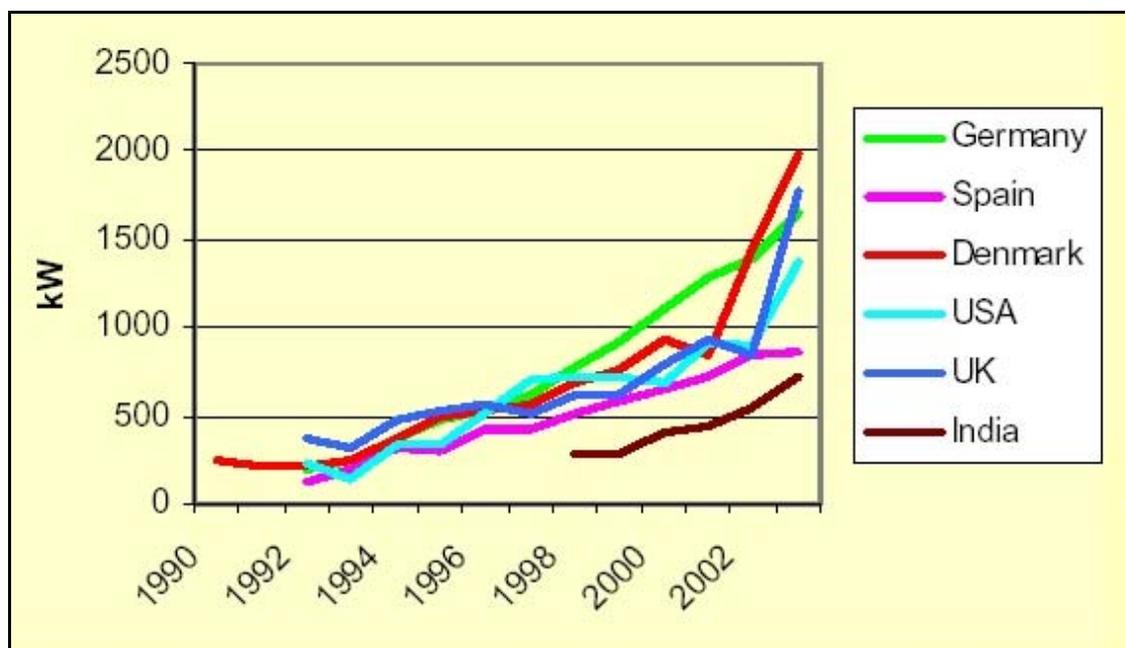


Figura 12. Evolución de la potencia promedio de las turbinas¹⁶.

¹⁵ El llamado factor de aprendizaje o *learning ratio* es el cociente entre un indicador (p. ej. el costo por kWh) calculado en un instante y luego de duplicada la capacidad instalada. La industria eólica ha obtenido sistemáticamente valores de 0,80 y mejores, es decir, reducciones de costo de más del 20% cada vez que se duplica la capacidad instalada.

¹⁶ Fuente: BTM Consult, Risø National Laboratory.

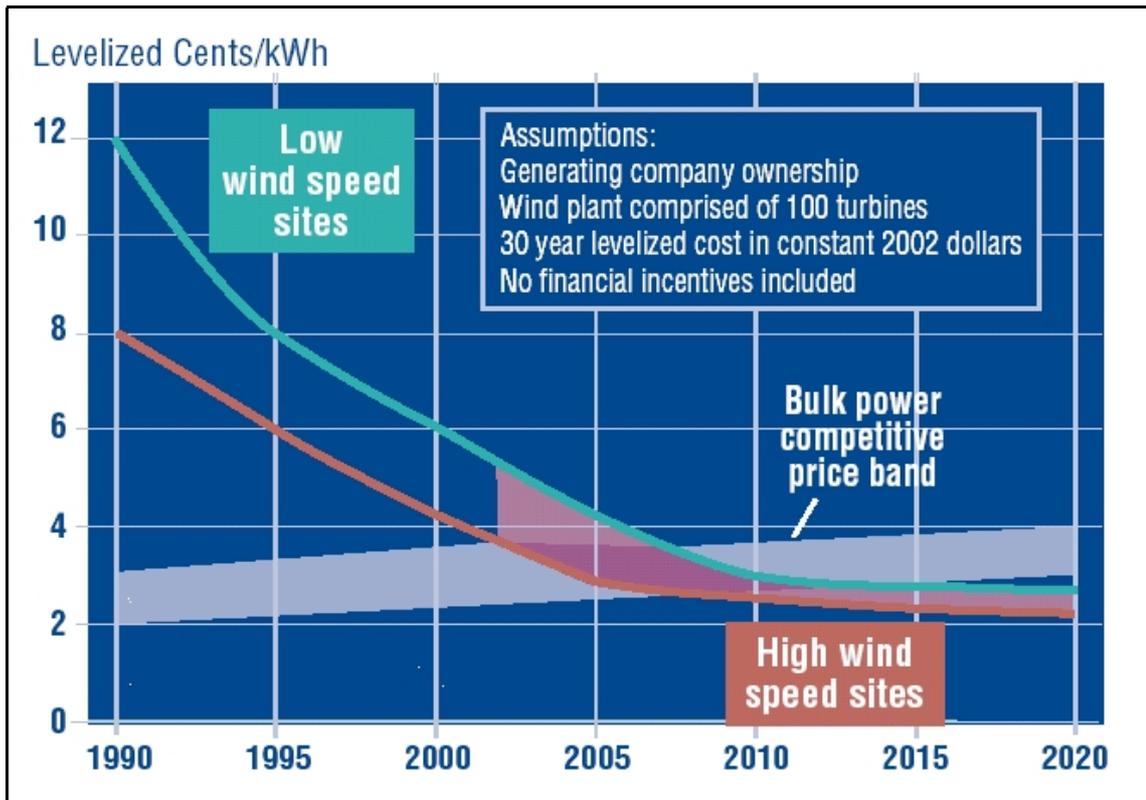


Figura 13. Evolución de los costos de generación en EE.UU.¹⁷

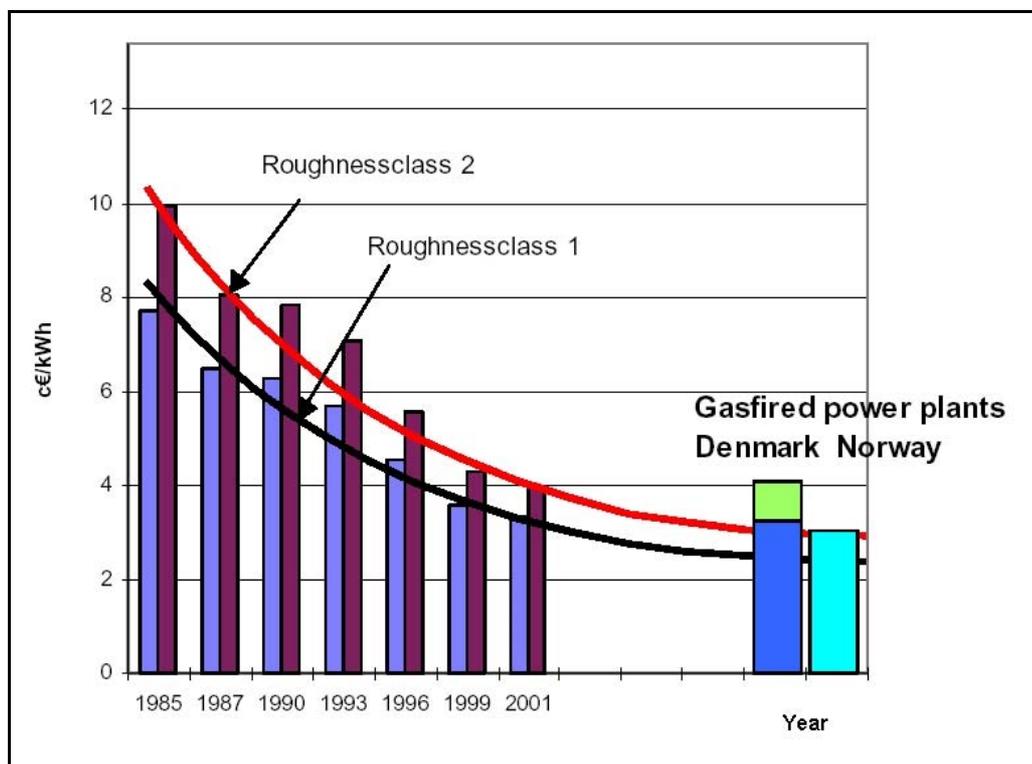


Figura 14. Evolución de los costos de generación en Dinamarca.¹⁸

¹⁷ Fuente: National Renewable Energy Laboratory.

Se espera que los costos de generación continúen disminuyendo. Las proyecciones prevén un costo de generación de 25 US\$/MWh producido y un costo de inversión menor a 600 US\$/MW instalado para el año 2020. Actualmente, dependiendo del lugar (país, región, condiciones de viento, de mercado, etc.) estos valores están en 35-50 US\$/MWh y 900-1100 US\$/MW. Estas cifras hoy en día sitúan a la energía eólica como una opción competitiva en algunos nichos de mercado. Sin embargo, las proyecciones indican que en los próximos 5 a 10 años sea totalmente competitiva con las alternativas de generación más baratas en el presente (ciclos combinados a gas y centrales térmicas a carbón). Y en 15 años estará totalmente constituida como la alternativa de generación eléctrica más barata, en la mayor parte de los mercados mundiales. [14,17,18,19]

Es de destacar que estos costos están calculados en base a las condiciones que predominan actualmente, que son ciertamente desfavorables para el desarrollo de la energía eólica. La sección siguiente presenta un análisis de esta afirmación.

3.2.3. Level the playing field (igualdad de condiciones)

¿Cómo han hecho los países que hoy son líderes en capacidad instalada para conseguir esos niveles de desarrollo de la energía eólica?

Los motivos son varios, pero la principal causa es que han tenido un apoyo sostenido en las políticas por parte de los gobiernos a nivel nacional, provincial y municipal. Este apoyo no ha sido exclusivamente económico, más bien ha tendido a eliminar las barreras que impiden el desarrollo de la energía eólica.

La energía eólica enfrenta básicamente las barreras generales para todas las fuentes de energía renovable (ver tabla 1), sin embargo algunas son más significativas:

- Las redes de transmisión y distribución actuales han sido diseñadas para las fuentes convencionales de energía. La penetración de energía eólica en las redes, en mercados desregulados (tal la tendencia actuales) puede ser dificultosa sino se establecen reglas parejas para todas las nuevas fuentes de generación.
- Los subsidios (directos o en términos de exenciones fiscales u otros) que reciben las fuentes convencionales de energía distorsionan los precios de la energía.

¹⁸ Fuente: BTM Consult, Risø National Laboratory.

- El hecho que en los mercados el precio de la energía no incluye las externalidades provocadas por las distintas formas de generación coloca en desventaja a las fuentes *limpias*.
- Los desembolsos en I&D se aplican casi en su totalidad a las fuentes convencionales.
- No se valoran (por falta de información) por parte de la opinión pública y los encargados de tomar las decisiones en temas energéticos, los beneficios (externalidades positivas) que produce la energía eólica. Por ejemplo, como no utiliza combustibles para generar electricidad, los precios son estables y no están sujetos a volatilidades y riesgo. Está demostrado que genera de 2 a 5 veces más empleo (por unidad de potencia instalada) que las fuentes convencionales de energía.

Muchas de estas barreras pueden ser eliminadas o reducidas sin incurrir en costos importantes¹⁹. Por ejemplo, desarrollando mecanismos regulatorios que tengan en cuenta todas las fuentes de generación, modificando los porcentajes relativos destinados a I&D, etc. Sin embargo, hasta que no se incluyan las externalidades en el precio de la energía es necesario establecer mecanismos de apoyo concretos si es que se desea acelerar el desarrollo de la energía eólica. Si se incluyeran las externalidades en el precio de la electricidad, la energía eólica sería hoy la forma más barata de generación (figura 15).

¹⁹ De hecho, los beneficios económicos asociados al desarrollo de la energía eólica han probado ser mayores a los costos incurridos al eliminar estas barreras, en los países que han sostenido políticas de este tipo.

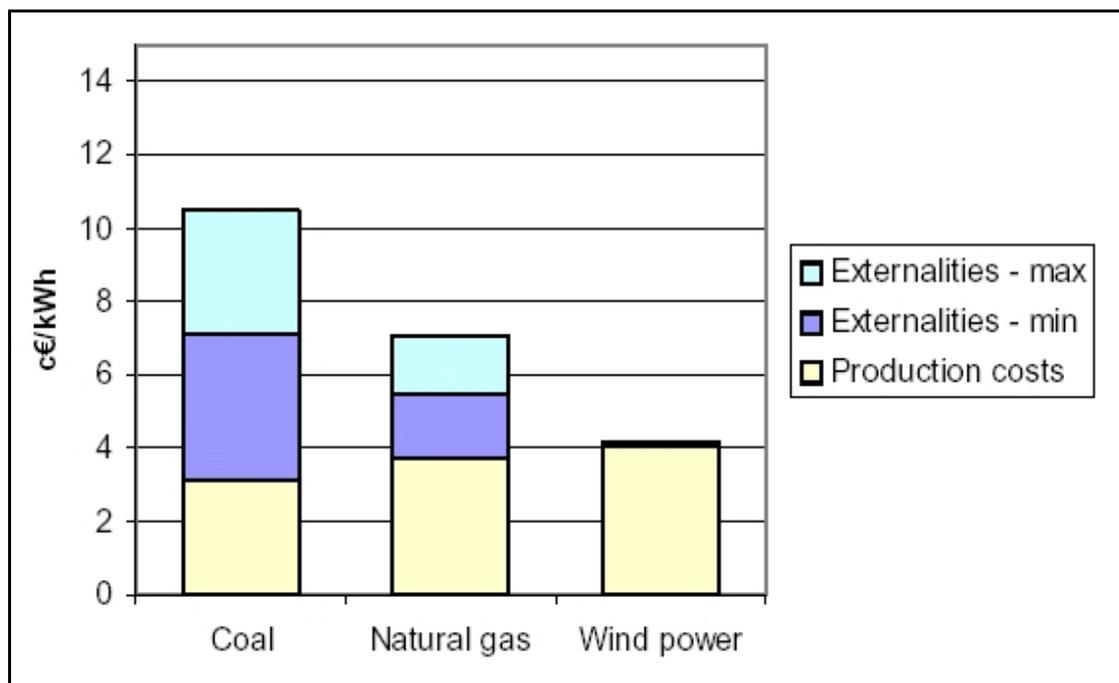


Figura 15. Costos nivelados de generación promedio en Europa teniendo en cuenta externalidades²⁰.

Los mecanismos más utilizados para incentivar el uso de la energía eólica pueden ser categorizados dentro de los siguientes dos tipos: de precio o de cantidad. En los mecanismos de precio (mercados de créditos *verdes*, precio fijo, subsidios a la inversión, tarifas de *feed-in* fijas, sistemas de precio *premium*, créditos impositivos) básicamente se interviene sobre el precio y se deja que el mercado regule la cantidad de equilibrio, mientras que en los mecanismos de cantidad (*Renewable Portfolio Standards*, sistemas de cuota) sucede a la inversa (se fijan las cuotas o cantidades de generación para cada fuente y se deja que el mercado establezca el precio. [14,20,21]

Los análisis de los distintos casos sobre los que hay experiencia histórica y los modelos teóricos no establecen cuál es el mejor método²¹. La recomendación es que se deben considerar todas las opciones y la mejor alternativa a aplicar en cada caso dependerá de condiciones particulares (de mercado, regulatorias, etc.) e inclusive puede consistir en un *mix* de mecanismos de incentivo.

Finalmente, los nacientes mercados de bonos de carbono post-Kyoto, los mecanismos de desarrollo limpio y otros mecanismos similares serán un

²⁰ Fuente: Risø National Laboratory, ExternE. El proyecto ExternE es actualmente la mayor iniciativa mundial tendiendo a cuantificar las externalidades producidas en todo el ciclo de vida por las distintas fuentes de energía. A pesar de que utiliza metodologías conservadoras y a la variabilidad inherente a las estimaciones, los resultados son cada vez más tenidos en cuenta por los distintos países de la Comunidad Europea.

²¹ A pesar que han probado ser algo mejores y más eficientes los incentivos *de precio*.

impulso adicional para las fuentes renovables de energía. Actualmente la tonelada de carbono equivalente se cotiza entre 5 y 10 US\$, pero estos valores se espera que aumenten sostenidamente en los próximos años (algunas estimaciones prevén valores del orden de 40 US\$ para el 2020).

3.2.4. El papel de la investigación y desarrollo.

El rol de la investigación y desarrollo ha sido identificado como una de las claves a tener en cuenta para permitir la penetración masiva de la energía eólica en la matriz energética. [22,23]

Los requerimientos de investigación y desarrollo en el mediano y largo plazo están indicados en la tabla 3.

De particular importancia para el largo plazo son los esfuerzos tendientes a reducir los costos, permitir una gran penetración de la energía eólica en las redes y minimizar los impactos ambientales. Ya se ha hecho un análisis sobre los costos futuros. A continuación se detallan los restantes dos temas.

Área	Necesidades
Incremento de valor de la energía producida, reducción de incertidumbre	Predicción de la producción energética
	Reducir incertidumbres asociadas a la integridad de los sistemas
	Mejoras y validación de las normas
	Técnicas de almacenamiento de electricidad
Reducción de costos	Mejoras en el estudio de localización, especialmente off-shore
	Mejores modelos aerodinámicos y aeroelásticos
	Mejoras en las estructuras, materiales y reciclado
	Generadores más eficientes, convertidores
	Reducción de costos de O&M
	Sistemas híbridos y aislados
Uso en gran escala	Control del flujo de potencia
	Controles adaptivos
	Mayor calidad de potencia
	Integración con las redes
Minimizar los impactos ambientales	Uso de tierra compatible
	Integración visual estética
	Estudios de emisiones sonoras
	Relación con flora y fauna

Tabla 3. Necesidades de Investigación y Desarrollo.

3.2.4.1. Penetración en las redes

En base a experiencias en las redes que hoy en día presentan las mayores penetraciones de energía eólica sobre el total del suministro y en base a estudios y modelos, el consenso establece que es factible, sin incurrir en costos significativos²², alcanzar niveles del 15 al 20%, con las tecnologías y conocimientos actuales. [14,24,25,26]

En el sistema interconectado Eltra, en el oeste de Dinamarca, las penetraciones han alcanzado niveles del 50%.

Igualmente, para alcanzar valores mayores al 20% en forma permanente (es decir, que en el promedio anual más del 20% de la energía consumida en un sistema haya sido producida por las turbinas eólicas) son necesarias mayores investigaciones y desarrollos. De particular importancia para el largo plazo son los sistemas capaces de almacenar electricidad, durante distintos intervalos de tiempo, para poder contrarrestar la intermitencia del suministro eólico.

Algunos de esos sistemas son actualmente utilizados para balancear los flujos de potencia y mejorar la calidad de suministro (capacitores, discos rotantes) y otros están en desarrollo (supercapacitores, superconductores). [27]

El uso de hidrógeno como vector energético y su posible aplicación (entre otras) como almacenador de energía eólica será tratado específicamente.

3.2.4.2. Impactos ambientales

Si bien la energía eólica es la alternativa de menor impacto ambiental para generar electricidad en base a análisis de ciclo de vida, no está exenta de ellos.

Un análisis de los mismos se presenta brevemente a continuación [14,15,29]:

- Ruido: desde los primeros modelos comerciales hasta el presente, los avances han sido significativos. El ruido mecánico casi ha sido anulado y el ruido aerodinámico es cada vez menor. A 300 metros de una turbina modera (que es menor que la distancia mínima generalmente requerida para emplazar una turbina respecto de la vivienda más cercana) el nivel sonoro es menor a 50dB y generalmente el nivel de ruido del propio viento interactuando con el ambiente es mayor.
- Interferencia electromagnética: ha sido probado que no es un factor de preocupación.

²² Es decir, sin necesidad de inversiones ad-hoc, sólo con costos asociados principalmente al gerenciamiento y administración de las redes y el despacho.

- Compatibilidad de uso de la tierra: Los parques eólicos utilizan cada vez porcentajes menores relativos de tierra (a igual potencia, menos turbinas más grandes en vez de muchas pequeñas). Salvo el mínimo porcentaje utilizado por la turbina y los equipos auxiliares y caminos, el resto es perfectamente compatible con actividades como la agricultura o la ganadería.
- Colisión con pájaros: Mejoras en los estudios de localización y otras medidas se estima que prácticamente eliminarán este impacto. La figura 16 muestra las causas antropogénicas de mortandad de aves en EE.UU.

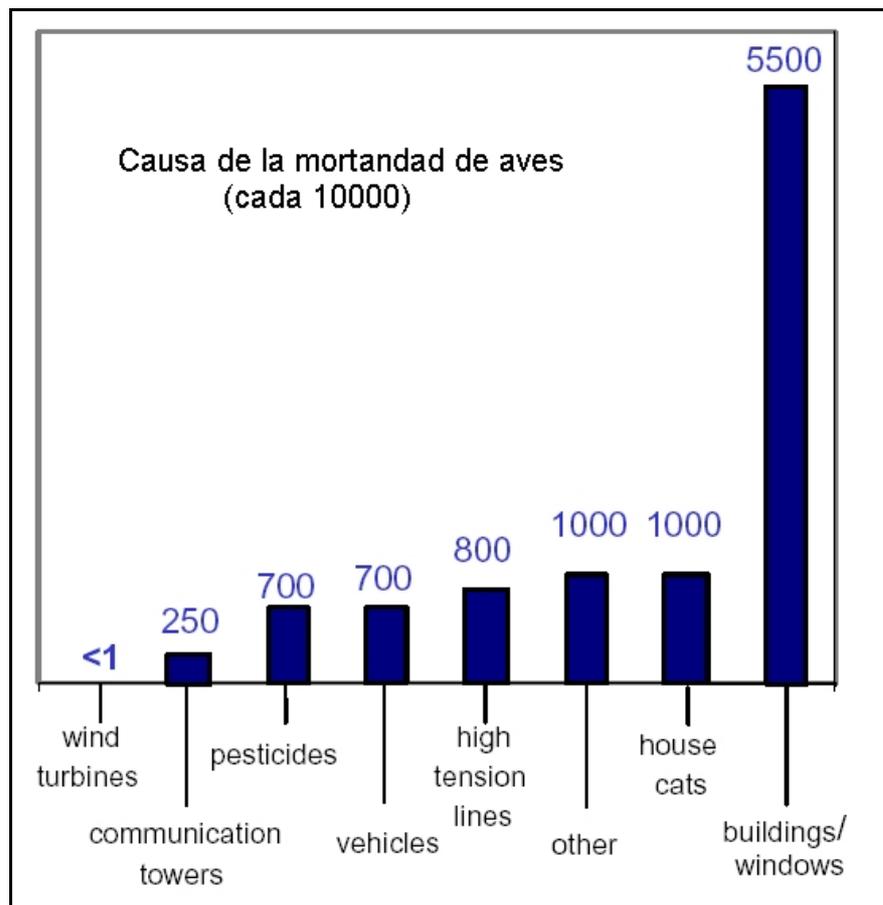


Figura 16. Causas antropogénicas de la mortandad de aves en EE.UU.²³

- Impacto visual: Es el más difícil de cuantificar, debido a que es muy subjetivo. No hay pruebas de que las turbinas tengan impacto negativo sobre el turismo (hay evidencias justamente de lo contrario) o sobre el valor de las propiedades (ídem). Igualmente, el conocimiento de la gente sobre los beneficios de esta fuente de energía y mejores técnicas de simulación de localización deberían ayudar a mitigar este impacto.

²³ Fuente: American Wind Energy Association.

3.3. Aplicaciones aisladas, sistemas híbridos y generación distribuida

Como ya se mencionó previamente, una aplicación importante de la energía eólica es en la escala de los kW o pocos MW.

Las turbinas eólicas generando electricidad acumulable en baterías convencionales son una aplicación común y extendida en los campos, para alimentar pequeños consumos en viviendas aisladas, estaciones repetidoras de telecomunicaciones y otros.

Sistemas eólicos de baja y mediana potencia, mediante algún acumulador de energía o sistema de *back-up* (baterías, sistemas diesel, o mejor aún, bio-diesel, solar fotovoltaico o hidrógeno) constituyen una alternativa muy viable para abastecer de electricidad a poblaciones dispersas, aisladas de las redes o con redes débiles. Haciendo un análisis caso por caso y eligiendo la tecnología renovable adecuada²⁴ se puede determinar la relación costo-beneficio óptima. Son distintas las consideraciones a tener en cuenta cuando se analizan sistemas de este tipo, porque los beneficios y costos no deben ser medidos en términos de maximización de rentabilidad o utilidades. Pero inclusive haciendo un análisis en estos términos (por ejemplo, un gobierno municipal financiará a la mejor alternativa privada, que buscará rentabilidad, para provisión de energía a un poblado disperso), los sistemas basados en energías renovables disponibles in-situ son en muchos casos más económicos que las fuentes convencionales. [29,30]

Para el caso de Argentina, vale mencionar que aproximadamente 3 millones de personas actualmente no tienen acceso a la electricidad.

No hay una definición universalmente aceptada, pero a fines de este trabajo, se entiende por generación distribuida la generación de electricidad cerca del punto de consumo en una red de distribución, a diferencia de la generación centralizada que hace uso de las redes de transmisión.

La generación distribuida es un concepto relativamente nuevo, que tuvo su origen en industrias que auto-cogeneran sus necesidades de calor y electricidad y venden el excedente de esta última a las compañías de distribución.

Sin embargo, sus aplicaciones van más allá de las unidades de cogeneración, principalmente como esquema compatible con la generación mediante fuentes renovables de energía. Porcentajes significativos de generación de energía mediante este esquema no se esperan en el corto plazo. Atada a este

²⁴ En determinados lugares el uso de biomasa o energía solar puede ser más conveniente.

desarrollo, la inserción de la energía eólica en sistemas de generación distribuida puede significar un impulso considerable a la misma en el mediano a largo plazo. [31,32,33,34,35,36]

3.4. El uso de hidrógeno como vector energético y su relación con la energía eólica.

Las características distintivas del hidrógeno lo hacen un candidato ideal para ser vector energético. No es una fuente de energía primaria, pero su potencial como acumulador de energías renovables intermitentes (entre otras tantas aplicaciones) lo convierten en el “compañero” ideal de la energía eólica, para permitir un desarrollo todavía mayor de ambos en el largo plazo.

Toda la temática de la economía del hidrógeno, el uso del mismo como vector energético, su relación con las fuentes de energías renovables, su uso como combustible para el transporte y otras tantas aplicaciones, además de análisis de ciclo de vida, tecnologías de producción, almacenamiento, su uso en celdas de combustible, cuestiones de seguridad y normativas, análisis económicos e impactos ambientales; pueden ser consultados en las referencias correspondientes, debido a que un análisis detallado del mismo está fuera del alcance del presente trabajo. [37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50]

Sin embargo, es particularmente revelador un trabajo (“DAEDALUS or Science and the Future”) presentado por J. B. S. Haldane en Cambridge, en ¡1923!

“[Este *paper*] será criticado por su indebido énfasis en ciertos temas desagradables. Esto es necesario si la gente ha de ser inducida a pensar sobre ellos. [...]”

En lo que respecta a los suministros de energía, es axiomático que el agotamiento de nuestros yacimientos de carbón y petróleo es cuestión de siglos solamente. [...]

La energía hidráulica no es, pienso, un probable sustituto, dada su pequeña cantidad, fluctuaciones estacionales y distribución esporádica. [...] En última instancia deberemos explotar esas intermitentes pero inagotables fuentes de energía, el viento y el sol. El problema es simplemente uno de almacenar su energía en una forma conveniente como lo son el carbón o el petróleo. Si un molino en su patio produjera unas cien libras de carbón diariamente (y de hecho puede producir su equivalente energético) nuestras minas de carbón cerrarían mañana. Incluso mañana una batería de almacenamiento barata, fácil de manejar y durable, podría ser inventada, lo que nos permitiría transformar la energía intermitente del viento en energía eléctrica en forma continua.

Personalmente, pienso entonces que en unos cuatrocientos años, la cuestión de la energía en Inglaterra podría ser resuelta algo así: El país estará cubierto con hileras de molinos metálicos impulsando motores eléctricos que a su vez proveerán corriente a altos voltajes hacia grandes redes de suministro. A distancias adecuadas, habrá grandes centrales de energía que durante tiempos ventosos el exceso de energía será usado para la descomposición electrolítica de agua en oxígeno e hidrógeno. Estos gases serán licuados y almacenados en grandes reservorios aislados por cubiertas evacuadas. Si estos reservorios son lo suficientemente grandes, la pérdida de energía debida al ingreso de calor no será considerable, por ende la proporción de evaporación diaria [...] no alcanzará 1/1000. En tiempos de calma, los gases serán recombinados en motores de explosión que moverán dínamos que a su vez producirán la energía eléctrica nuevamente, o más probablemente en celdas de oxidación. El hidrógeno líquido es en términos de peso el método más eficiente para almacenar energía, dado que entrega aproximadamente unas tres veces más calor por libra que el petróleo. Por el otro lado es muy liviano, y en términos de volumen tiene sólo un tercio la eficiencia del petróleo. [...] Estos grandes reservorios de gases licuados permitirán que la energía eólica sea almacenada, de modo que pueda ser gastada por la industria, el transporte, para calefacción e iluminación según se desee. Los costos iniciales serán considerables, pero los costos de operación menores que los de nuestro sistema actual. Entre las más obvias ventajas estará el hecho que la energía será tan barata en una parte del país como en la otra, de modo que la industria estará principalmente descentralizada; y no serán producidos humos ni cenizas.

Es en términos como estos que, creo, el problema será resuelto. Es esencialmente un problema práctico, y el agotamiento de nuestros yacimientos de carbón proveerá el estímulo necesario para su solución.”

3.5. Perspectivas para Argentina

El potencial eólico con que cuenta el país es vastísimo, principalmente en la Patagonia, que cuenta con uno de los mejores recursos del mundo, pero también en otras regiones, como la costa atlántica de la Provincia de Buenos Aires.

Actualmente la capacidad instalada en el país es poco mayor a 26 MW, distribuidos en parques eólicos, siendo el mayor de ellos el situado en Comodoro Rivadavia. Este parque ha obtenido durante los años que lleva operando, factores de carga mayores al 40%, los cuales son sensiblemente mayores a los niveles promedio alcanzados en el mundo.

Las dos aplicaciones que hoy son viables son en la escala de los kW (abastecimiento disperso) y en la escala de los MW (generación en parques y suministro a las redes). Ambas alternativas necesitan de mecanismos de incentivos por parte del gobierno si es que se desea acelerar el desarrollo de la energía eólica. En caso contrario, el escenario es de un crecimiento sostenido, pero a ritmos muy moderados, por lo menos por los próximos 5 a 10 años. Ha habido intentos de impulsar el desarrollo de las energías renovables en el país (p. ej. mediante la sanción de la ley 25.019 en 1998 y reglamentada en 2001, de fomento a las energías renovables), sin embargo, debido a la crisis del 2001 y a otros factores, no han tenido mayores efectos. Es de fundamental importancia para el desarrollo de las energías renovables el sostenimiento en el tiempo de las políticas de fomento, independientemente de cuál sea el mecanismo elegido.

La actual crisis energética presenta al mismo tiempo oportunidades y amenazas. Es una decisión principalmente política el camino a adoptar en términos de planeamiento energético.

La producción de petróleo en el país ya alcanzó su máximo. Tenemos reservas de gas para 10 años²⁵ y las proyecciones indican que podríamos estar *importando* energía (mientras que hoy *exportamos*) en menos de 15 años.

Se estima que los precios de la energía van a aumentar de aquí en más, al contrario de lo que sucedió en la década de los 90' con la desregulación exitosa de los mercados.

Por otro lado, los beneficios adicionales de las fuentes de energía renovables, tales como la mayor generación de empleo y el impulso a las economías regionales, deberían ser tenidos en cuenta al momento de tomar decisiones estratégicas.

Finalmente, en el largo plazo, en el orden de los GW, son muy grandes las perspectivas de una producción a gran escala de hidrógeno aprovechando el potencial patagónico, posiblemente para consumo interno en transporte y exportación de energía. [51]

²⁵ Fuentes: Instituto Argentino de la Energía General Mosconi, Instituto Argentino del Petróleo y el Gas.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De aquí a los próximos cincuenta años, es *posible* una matriz energética similar a la actual, con una dependencia excesiva de los combustibles fósiles. Sin embargo, se ha pretendido demostrar que tal escenario es, ante todo, *no sustentable*, desde una concepción moderna de desarrollo humano sostenible.

La única alternativa viable para abastecer de energía al mundo en el largo plazo, es mediante el uso de las fuentes renovables de energía.

La energía eólica ha demostrado ser un caso de éxito en la consecución de este objetivo. Puede ser tomada como modelo para el posterior desarrollo de las restantes fuentes renovables de energía. Sin embargo, para todas ellas, es necesaria la eliminación o reducción de las barreras que impiden o limitan su crecimiento, hecho que se logrará sólo mediante un fuerte y sostenido compromiso político a nivel mundial y en cada país, y mediante la activa participación de todos los involucrados en el planeamiento y desarrollo energético.

Los beneficios económicos, sociales, ambientales y políticos derivados del uso creciente de la energía eólica superan con creces los costos y esfuerzos requeridos para su desarrollo.

Las aplicaciones actuales son variadas: como fuente de electricidad para consumos aislados o con redes de distribución débiles, para suministrar porcentajes cada vez mayores de energía en el mercado eléctrico mayorista. Asimismo, se vislumbran nuevos usos a futuro, en sistemas generación distribuida y tomando parte en economías del hidrógeno, al usar a éste último como vector energético.

Las posibilidades de desarrollo de la energía eólica en la Argentina son vastísimas, pero las acciones arriba mencionadas son todavía más imperiosas si se quiere desarrollar ésta y otras fuentes renovables de energía en nuestro país en el corto a mediano plazo.

4.1. Recomendaciones finales

El ITBA, como institución líder formadora de profesionales en el ámbito de la ingeniería, puede contribuir hacia la consecución de estos objetivos, ayudando a eliminar barreras de tipo tecnológicas y de capacidad.

Algunas acciones concretas e inmediatas de alcance e impactos significativos que pueden ser llevadas a cabo sin mayores problemas, son:

- La inclusión en los planes de estudio de materias relacionadas con el desarrollo sustentable y las fuentes renovables de energía. Actualmente el ITBA no cuenta, ni aún en carácter de electiva, con una materia abocada a esta temática a nivel de grado.
- El fomento de trabajos a nivel alumno relacionados con estos temas. Si bien la selección de los temas de Proyecto Final o las iniciativas de Investigación y Desarrollo han sido y deben seguir siendo de libre elección, se pueden dar a conocer los trabajos hechos hasta el momento en el ITBA y sugerir a modo orientativo temáticas o aspectos que pueden ser interesantes para futuros proyectos.

5. REFERENCIAS

- [1] Consejo Mundial de la Energía “Energía para el mundo del mañana – Actuemos ahora”, Objetivo de la Declaración del Consejo Mundial de la Energía para el año 2000.
- [2] Nakicenovic N. “Global Energy Scenarios for Sustainable Development”, Energy Technologies for Post Kyoto Targets in the Medium Term, Risø International Energy Conference, Copenhagen, Dinamarca, Mayo 19 2003.
- [3] Shell International, Global Business Environment “Energy Needs, Choices and Possibilities. Scenarios to 2050”, 2001.
- [4] Garibaldi C.A. “Global warming and energy supply: scientific debate or cultural warfare?”, La innovación tecnológica en el desafío energético del futuro, Buenos Aires, Septiembre 14-17 2004.
- [5] Zittel W., Schindler J. “The Countdown for the Peak of Oil Production has begun – but what are the view of the most important International Energy Agencies”, Oil Depletion Analysis Centre, October 2004.
- [6] European Commission “Towards a European strategy for the security of energy supply”, Green Paper, November 2000.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change “Climate Change 2001: Synthesis Report”. A contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assesment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 2001.
- [8] Painuly J.P., Fenhann J. “Implementation of renewable energy technologies - opportunities and barriers. Summary of country studies”, Risø National Laboratory, UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment, Roskilde, 2002.
- [9] European Renewable Energy Council “Renewable Energy Scenario to 2040. Half of the global energy supply from renewables in 2040”, EREC, May 2004.
- [10] Zervos A., Lins C., Schäfer O. “Tomorrow’s world”, Renewable Energy World, Review Issue 2004-2005, Julio-Agosto 2004.
- [11] International Conference for Renewable Energies “Conference Report. Outcomes & Documentation – Political Declaration/International Action Programme/Policy Recommendations for Renewable Energies”, Bonn, Germany, June 1-4 2004.

- [12] International Solar Energy Society “Transitioning to a Renewable Energy Future”, White Paper, 2003.
- [13] Secretaría de Energía de La Nación “Descripción, desarrollo y perspectivas de las energías renovables en la Argentina y en el mundo”, Argentina, Mayo 2004.
- [14] European Wind Energy Association “Wind Energy: The Facts. An analysis of wind energy in the EU-25”, 2003.
- [15] American Wind Energy Association “Wind Energy. Myths vs. Facts”, AWEA’s Wind Energy Fact Sheets, April 2005.
- [16] European Wind Energy Association, Greenpeace “Wind Force 12. A blueprint to achieve 12% of the world’s electricity from wind power by 2020”, May 2004.
- [17] Morthorst P.E. “Economics of Wind Power”, Risø International Energy Conference, Risø National Laboratory, Denmark, May 19-21 2003.
- [18] Morthorst P.E., Chandler H. “The cost of wind power”, Renewable Energy World, Review Issue 2004-2005, Julio-Agosto 2004.
- [19] US Department of Energy “Wind Power. Today & Tomorrow”, Energy Efficiency and Renewable Energy, Wind and Hydropower Technologies Program, March 2004.
- [20] Noguee A., Clemmer S., Paulos B., Haddad B. “Powerful Solutions. 7 ways to switch America to Renewable Electricity”, Union of Concerned Scientists, January 1999.
- [21] Reeves A. “Wind Energy for Electric Power. A REPP Issue Brief”, Renewable Energy Policy Project, July 2003.
- [22] International Energy Agency R&D Wind Implementing Agreement “Long-term research and development needs for wind energy for the time frame 2000 to 2020”, October 2001.
- [23] European Wind Energy Association “The European wind industry strategic plan for research & development. First Report: Creating the knowledge foundation for a clean energy era”, January 2001.
- [24] Parsons B., Milligan M., Zavadil B., Brooks D., Kirby B., Dragoon K., Caldwell J. “Grid Impacts of Wind Power: A Summary of recent studies in

- the United States”, European Wind Energy Conference, Madrid, Spain, June 2003.
- [25] Slootweg J.G., Kling W.L. “Is the answer blowing in the Wind?”, IEEE Power & Energy, November-December 2003.
- [26] Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico “Conceptos Básicos sobre la inserción de la Generación Eólica en un Sistema Eléctrico de Potencia”, CAMMESA.
- [27] Roberts B., McDowall J. “Commercial Successes in Power Storage”, IEEE Power & Energy, March-April 2005.
- [28] Andersen P.D., Borup M. “Long-Term Considerations on Wind Power’s Environmental Impact”, Risø International Energy Conference, Risø National Laboratory, Denmark, May 19-21 2003.
- [29] Grimsø L.N., Korpaas M., Gjengedal T., Møller-Holst S. “A Study of a stand-alone Wind and Hydrogen System”, Nordic Wind Power Conference, March 1-2, 2004.
- [30] EU Altener Programme “H-SAPS. Market Potential Analysis for Introduction of Hydrogen Energy Technology in Stand-Alone Power Systems”, Final Report, 2004.
- [31] Decent Project “Decentralized Generation: Development of EU Policy”, Report in the framework of the Decent Project, October 2002.
- [32] Strauss P., Meyer T., Erge T., Degner T. “DISPOWER – Distributed Generation with High Penetration of Renewable Energy Sources”, European Commission under the 5th Framework Programme, 2004.
- [33] Comisión Nacional para el Ahorro de Energía “, Generación Distribuida. Energía de Calidad”, México, Enero 2003.
- [34] Norambuena R.G., Vieyra R.M. “Generación Distribuida”, Informe final trabajo de investigación, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Junio 2003.
- [35] Püttgen H.B., MacGregor P.R., Lambert F.C. “Distributed Generation: Semantic Hype or the Dawn of a New Era?”, IEEE Power & Energy, January-February 2003.

- [36] Bzura J.J., Eyer J., Gutierrez-Vera J., Hoff T.E., Herig C., Ianucci J., Milligan M.R. "Renewable Technologies and Distribution Systems", IEEE Power Engineering Review, November 1999.
- [37] United States Department of Energy "A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy – To 2030 and beyond", US DOE, February, 2002.
- [38] United States Department of Energy "National Hydrogen Energy Roadmap. Toward a More Secure and Cleaner Energy Future for America", US DOE, November, 2002.
- [39] United States Department of Energy "Hydrogen Posture Plan. An Integrated Research, Development, and Demonstration Plan", US DOE, February, 2004.
- [40] International Energy Agency "In Pursuit of the Future. 25 years of IEA Research towards the realisation of Hydrogen Energy Systems", IEA Implementing Agreement, June 2004.
- [41] European Commission "Hydrogen Energy and Fuel Cells. A vision of our future", Final Report of the High Level Group on Hydrogen and Fuel Cell Technologies, 2003.
- [42] European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies "Potential for Hydrogen as a Fuel for Transport in the Long Term (2020-2030) – Full Background Report –", European Communities, 2004.
- [43] Spinadel E. "Producción de hidrógeno y estrategias", Hidrógeno y la Energía del Futuro, Buenos Aires, Marzo 23-24 2004.
- [44] Riso National Laboratory "Hydrogen and its competitors", Riso Energy Report 3, 2004.
- [45] Wurster R. "Hidrógeno – Visión general y economía del H₂", Hidrógeno y Energía, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, Julio 21 2003.
- [46] González García-Conde A. "Hacia la economía del Hidrógeno", Fundación Iberdrola, Abril 2004.
- [47] Kruse B., Grinna S., Buch C. "Hydrogen. Status og muligheter", Bellona rapport nr. 6, 2002.

- [48] Altmann M. “Drivers for and Barriers towards a Hydrogen Based Energy System”, Hydrogen and Fuel Cell Based Energy Systems in a Future Sustainable Energy World, Vienna, Austria, March 31 and April 1 2004.
- [49] Padró C.E.G., Putsche V. “Survey of the Economics of Hydrogen Technologies”, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, September 1999.
- [50] Schindler J. “Life Cycle Analysis of Hydrogen Fuel”, European Hydrogen Energy Conference, Grenoble, France, Septiembre 2-5 2003.
- [51] Asociación Argentina de Energía Eólica, Presentación en la Renewable Energy Conference, Bonn, Alemania, 2004.

ANEXO – TRABAJOS EN ENERGÍA EÓLICA E HIDRÓGENO EN EL ITBA

A continuación se presenta un resumen del proyecto *micro aerogenerador* llevado a cabo en el ITBA durante 2003 y 2004 por quien suscribe y otros alumnos del Instituto, tutorados por docentes de la casa y con colaboración de especialistas externos. Asimismo, se presenta un breve resumen del trabajo realizado hasta el momento por Ricardo Lauretta, docente e investigador de la casa, en producción electrolítica y almacenamiento de hidrógeno.

El material ha sido extractado de las siguientes publicaciones:

- [A1] Ayestarán A.C., Bodoira J.A., Zimmermann N. “Diseño, construcción y ensayo de un micro aerogenerador”, Concurso de Iniciación en Investigación y Desarrollo, ITBA, Noviembre 2003.
- [A2] Argüelles, A.R., Ayestarán A.C., Bodoira J.A., Caballero M.L., Zimmermann N. “Micro aerogenerador. Evolución I: Implementación de un sistema de adquisición de datos y rediseños mecánicos”, Concurso de Iniciación en Investigación y Desarrollo, ITBA, Octubre 2004.
- [A3] Ayestarán A.C., Bodoira J.A., Zimmermann N. “Uso de energía eólica para obtención de hidrógeno por electrólisis. Maqueta del proceso y prototipo del aerogenerador”, La innovación tecnológica en el desafío energético del futuro, Buenos Aires, Septiembre 14-17 2004.
- [A4] Ayestarán A.C., Bodoira J.A., Zimmermann N. “Diseño, construcción y ensayo de un micro aerogenerador”, Concurso Energía para el Desarrollo, Instituto Argentino de la Energía General Mosconi, 2004.
- [A5] Lauretta, J.R. “Producción y almacenamiento de hidrógeno a alta presión”, será publicado en Hyfusen - Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía, San Carlos de Bariloche, Junio 8-10, 2005.

El objetivo del proyecto conjunto en términos generales consiste en lograr una unidad autónoma de cogeneración de electricidad e hidrógeno a partir de energía eólica para abastecer consumos aislados con una tecnología limpia aprovechando un recurso renovable abundante en Argentina.

La idea del proyecto se inspira en las posibilidades de desarrollo socioeconómico que traería aparejado el aprovechamiento del potencial eólico de nuestro territorio, mediante la utilización de equipos desarrollados y construidos en el país.

Actualmente se cuenta con una maqueta funcional que reproduce la totalidad del proceso y un prototipo de micro aerogenerador. Se está trabajando en la construcción de una cuba electrolítica capaz de generar hidrógeno a altas presiones así como en el diseño de un recipiente seguro y eficiente para el almacenamiento del hidrógeno.

A.1. Proyecto micro aerogenerador

A.1.1. Resumen

El objetivo de este proyecto fue el de estudiar el proceso integral de diseño, construcción y ensayo de aerogeneradores. Se decidió llevar a cabo esta tarea tanto en forma teórica, con la búsqueda de bibliografía reciente sobre la materia, como en forma práctica, construyendo un prototipo de baja potencia (100 W nominales).

Se cumplieron todas las etapas planteadas. El aerogenerador se encuentra actualmente instalado y funcionando en el ITBA. Los ensayos preliminares de *performance* arrojan los siguientes resultados:

- Potencia máxima generada: 100 ± 10 W a 9 m/s
- Rendimiento de la hélice: $C_p = 0,38 \pm 0,10$ a 9 m/s
- Rendimiento del generador eléctrico: $0,50 \pm 0,02$ a 800 rpm

En base a observaciones sobre el funcionamiento del mismo se comenzó con un proceso de rediseño mecánico. Asimismo, se está desarrollando un sistema integral de adquisición de datos y monitoreo que permitirá obtener información que, una vez procesada adecuadamente, servirá para: relevar la curva de potencia, medir vibraciones estructurales, calcular rendimientos aerodinámicos y electromecánicos, entre otros. Finalmente, los ensayos serán el punto de partido para orientar correctamente los esfuerzos tendientes a la optimización de todo el conjunto.

A.1.2. Proceso general de diseño

La secuencia de pasos necesaria para diseñar y dimensionar un aerogenerador es:

- Definir la necesidad energética a satisfacer. Los factores a tener en cuenta son:
 - Interconexión a la red de transmisión o instalación aislada.
 - Magnitud de la instalación (micro, pequeña, mediana o grande):
 - * Potencia máxima a instalar
 - * Energía anual media a entregar

- Realizar un estudio anemométrico.
- Elegir un generador eléctrico acorde y realizar los ensayos correspondientes.
- Diseñar la hélice para entregar al generador la potencia mecánica y cupla que éste requiere.
- Calcular las sollicitaciones mecánicas que debe soportar la estructura y dimensionarla en consecuencia.
- Elegir y diseñar un sistema de control apropiado

A.1.3. Análisis de factibilidad y determinación de los lineamientos generales del proyecto

Se tomó como punto de partida que la potencia nominal del aerogenerador no debía superar los 1000W, sabiendo que aquellos que lo superan presentan los mismos problemas técnicos que las grandes turbinas eólicas, imposibilitando su concreción con los tiempos y recursos disponibles para este proyecto.

Teniendo en cuenta los objetivos planteados en términos de la dimensión del proyecto, se buscó que el generador eléctrico tuviera las siguientes características:

- Capacidad de generar energía a bajas revoluciones
- Potencia acorde a las dimensiones del proyecto (micro aerogenerador).
- Pequeñas dimensiones.
- Bajo peso.
- Bajo costo.
- Robustez adecuada.

Se consiguió un generador sincrónico de imanes permanentes, multipolo (3 pares), de baja potencia, aportado gentilmente por el fabricante Sr. Juan Giacobone²⁶. Dicha máquina cumple con las características requeridas, ya que ha sido diseñada para ser utilizada en aerogeneración.

²⁶ Giacobone, División Energías, Generadores Eólicos.

A.1.3.1. Localización

Fue necesario elegir un lugar alto, abierto a los vientos y que respetara las normas urbanas de construcción y seguridad. El sitio también debía ser de fácil acceso para facilitar su construcción y mantenimiento. Se escogió finalmente instalarlo en la terraza del edificio del ITBA. El lugar fue inspeccionado y aprobado por el Jefe de Seguridad Industrial del Instituto.

A.1.3.2. Estructura de soporte

Para simplificar las tareas de instalación, ensayos y reparaciones (evitando las dificultades de acceder al aerogenerador desde la base de la torre) se diseñó un sistema que permitiera rebatirlo, pivotando la estructura en su punto de apoyo más bajo. De esta manera se alcanza al aerogenerador sin necesidad de trabajar en altura.

A.1.3.3. Sistema de control

La energía captada por un aerogenerador varía con el cubo de la velocidad del viento, por lo que un dispositivo eólico que capta 100W de potencia nominal sería capaz de generar 27 veces esa cantidad (2700W) cuando la velocidad del viento se triplica. Este ejemplo pone en evidencia la necesidad de implementar un sistema de control para evitar que esto suceda, debido a las cargas mecánicas excesivas que dañarían el aparato.

Siendo la seguridad otro aspecto importante en el análisis de la factibilidad del proyecto, también fue considerada al momento de diseñar el sistema de control.

El mismo debía ser:

- simple.
- con baja probabilidad de falla.
- económico.
- eficiente (en el sentido de permitir el mejor aprovechamiento posible de la energía).

La mayoría de los aerogeneradores de pequeña potencia tienen sistemas de control mecánicos que son más simples y económicos (aunque menos eficientes) que los electrónicos. Los primeros aprovechan alguna propiedad que varíe con la velocidad del viento incidente (en general la fuerza centrífuga

de las aspas o el empuje axial de las mismas) para variar la cantidad de energía captada.

Para este proyecto se optó utilizar el segundo método, que tiene como ventaja la posibilidad de incluir un dispositivo de accionamiento manual para el caso de falla mecánica.

A.1.4. Ensayos preliminares

A.1.4.1. Anemometría (estudio de la velocidad del viento)

Objetivos:

Un estudio anemométrico usualmente se realiza en las primeras fases de diseño para evaluar factores:

- de factibilidad: determinar si es posible técnica y económicamente la instalación de un aerogenerador en una zona o región geográfica
- de localización: elegir el lugar óptimo de emplazamiento
- técnicos: obtener parámetros necesarios para el diseño tanto del aerogenerador como de la estructura de soporte.

Debido a que el lugar de instalación fue elegido en base a consideraciones especiales²⁷, el estudio se realizó en este caso para:

- Aprender a realizar un estudio anemométrico
- Conocer el potencial eólico del lugar de emplazamiento

Metodología experimental:

Se instaló un anemómetro en la terraza del edificio del ITBA, lugar de instalación del aerogenerador.

Resultados

Para describir las distribuciones de la velocidad del viento se utilizan distintas funciones de densidad de probabilidad; entre ellas la Weibull, Rayleigh (caso particular de la anterior), la Beta y la LogNormal. La mayoría de los autores se inclina por la de Weibull de dos parámetros y es la que se utilizó.

²⁷ Teniendo en cuenta los objetivos planteados para el proyecto, se priorizó tener un fácil acceso al lugar para realizar ensayos por sobre una optimización en la elección del mismo en términos energéticos.

Existen diversas opiniones sobre cómo obtener los parámetros Weibull que mejor aproximan un histograma de frecuencias dado. Se ha utilizado, atendiendo a los consejos del Ing. Roberto García, especialista en Estadística Aplicada y docente del Instituto, el método de máxima verosimilitud.

A continuación se muestra el histograma de frecuencias de los datos medidos y la gráfica de la distribución de probabilidad Weibull con los parámetros ajustados (figura A1).

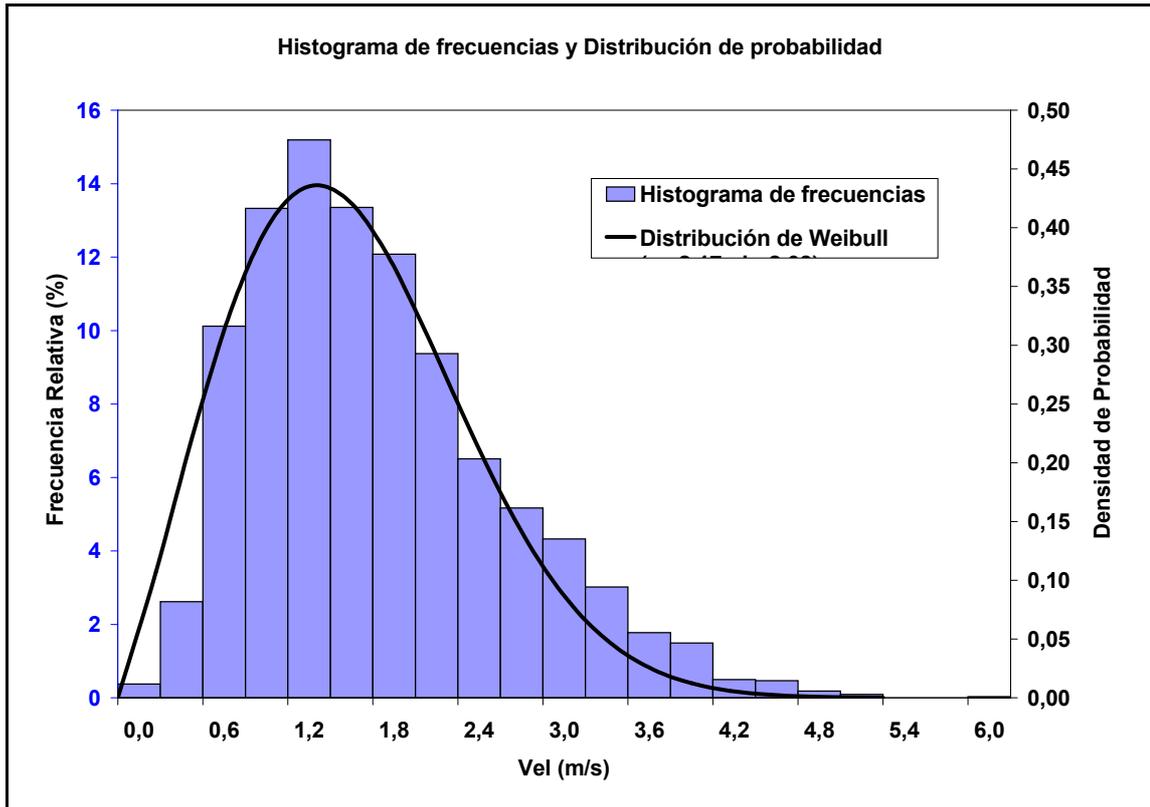


Figura A1. Distribución de las velocidades de viento.

Conclusiones

Los datos obtenidos para el tiempo de muestreo (un mes) indican que el lugar es muy pobre en términos de su potencial energético (los valores mínimos recomendados van de 4m/s a 8 m/s según el tamaño y la aplicación del aerogenerador)²⁸. Los datos no son concluyentes debido a que es necesario hacer un estudio de (por lo menos) un año para registrar posibles variaciones estacionales²⁹.

²⁸ Por este motivo no se han hecho estimaciones de la energía anual obtenible.

²⁹ No obstante esto, datos recogidos tanto por el Servicio Meteorológico Nacional como por particulares permiten afirmar que la ciudad de Bs.As. no es un lugar apto para el aprovechamiento eólico.

Por último, se ha podido comprobar la efectividad de los métodos probabilísticos en general, y de la distribución de Weibull en particular, para caracterizar las variaciones reales de la velocidad del viento.

A.1.4.2. Ensayo del generador eléctrico

Objetivo

Determinar las características eléctricas del generador:

- La impedancia de máxima transferencia de potencia
- Curva cupla vs velocidad
- Curva de potencia
- Curva de rendimiento

Procedimiento

- Parámetros medidos:
 - De entrada:
 - Cupla (en el eje del motor impulsor)
 - Velocidad de giro (de la máquina impulsora)
 - Potencia mecánica entregada en el eje.
 - De salida:
 - Tensión.
 - Corriente.

Se acopló el generador a un motor de corriente continua mediante un mecanismo de poleas y correa.

Conclusiones

- La impedancia de máxima transferencia de potencia es de 2,88 Ω .
- La potencia obtenible a bajas revoluciones es pequeña, del orden de 100W a 800 rpm.

- El rendimiento es del $50 \pm 2 \%$ a 800 rpm, valor bajo para este tipo de máquinas.
- El generador tiene salida de baja tensión, por lo que la corriente de salida es alta. Esto indica que probablemente el generador haya sido diseñado para la carga de baterías o una aplicación similar.
- La cupla de arranque para una carga de $2,88 \Omega$ es de 0.33 N.m.

A.1.5. Diseño mecánico

A.1.5.1. Hélice

Se definieron los siguientes parámetros:

- *Velocidad de viento nominal:* Se tomó de 9m/s, valor adecuado para pequeños aerogeneradores en aplicaciones aisladas (no conectadas a la red de distribución).
- *Velocidad de rotación nominal:* Se determinó un valor de 800 rpm, que es un valor razonablemente alto para un adecuado acople directo con el generador eléctrico, pero que está limitado debido a que valores mayores tendrían como consecuencia un diseño de palas con muy poca resistencia estructural.
- *Diámetro del rotor:* Se calculó según la fórmula:

$$R = \sqrt{\frac{2 \times Pe}{\pi \times \eta \times \rho \times V^3}}$$

$$R = 0,7 \text{ m}$$

Donde:

Pe : Potencia eléctrica a la salida del generador

η : Rendimiento global, de la hélice y el generador

ρ : Densidad del aire

V : Velocidad de diseño

- *Número de palas*: Se eligió hacer una hélice de 3 palas. Un número mayor tendría un costo demasiado elevado comparado con la poca ganancia en eficiencia. Los otros valores posibles, 1 o 2 palas, fueron descartados porque, si bien se ahorra considerablemente en costo, tienen mayores problemas de alineación, balanceo y vibraciones.

A.1.5.2. Aspas

El primer paso fue elegir el perfil de aspa a utilizar. Se eligió el Wortmann FX 63-137, desarrollado en la Universidad de Stuttgart. Éste perfil tiene muy buen comportamiento estructural y aerodinámico, debido a su forma cóncavo-convexa. Ha sido utilizado con éxito en otros aerogeneradores, entre ellos la “Turbina Eólica Argentina” de 10 KW y el aerogenerador “INDAER” de 1KW.

Para optimizar los valores de los parámetros de diseño es necesario recurrir a teorías de aerodinámica que incluyen efectos complejos. Las ecuaciones diferenciales que describen el modelo óptimo son irresolubles en forma analítica. Se procede entonces a un cálculo mediante métodos numéricos.

Los resultados obtenidos siguiendo este método iterativo fueron³⁰:

- *Geometría*
 - $c_{pp} = 60$ mm (cuerda en la punta de la pala)
 - $c_{ra} = 120$ mm (cuerda en la raíz de la pala)
 - $\mu = 12^\circ$ (alabeo)
 - Paso en la punta de la pala = 7°
- *Resultados nominales*
 - Cupla = 3.59 N.m
 - $P_{captada} = 282.48$ W
 - Fuerza axial = 55.78 N
 - Velocidad de corte inferior (cupla del rotor > cupla de arranque del generador con carga) = 4 m/s

³⁰ El Dr. Ricardo A. Bastianón gentilmente prestó un software de desarrollo propio que permite realizar el algoritmo de iteración mencionado.

- **Cp = 41%**
- *Resultados para velocidad de supervivencia*
 - $V_{\text{super}} = 28 \text{ m/s}$
 - Fuerza axial = 254.727 N

A.1.5.3. Partes mecánicas

Todas las piezas del aerogenerador fueron diseñadas y construidas por el equipo de trabajo.

A.1.5.4. Sistema de control

El objetivo del sistema de control es lograr que, cuando el viento incidente sobre el aerogenerador supera la velocidad de diseño (9m/s), la energía captada se mantenga constante³¹.

El funcionamiento del sistema de control se basa en los siguientes hechos:

- El aerogenerador está solidario a un eje³², paralelo al plano de giro de las aspas y ubicado por debajo del eje de las mismas, de movimiento de rotación libre.
- La fuerza horizontal que incide sobre las aspas varía con el cuadrado de la velocidad del viento. Esto produce un momento variable con respecto al eje del sistema de control. En el diseño de las aspas se obtuvieron los valores extremos de la fuerza axial (a velocidad nominal y a velocidad de supervivencia) por lo que se pudo aproximar la curva para el resto de los valores de velocidad del viento.
- El peso del aerogenerador produce un momento con respecto al eje del sistema de control.
- Se soldaron al eje del sistema de control dos palancas sendos pesos en los extremos que regulan los efectos de las otras dos fuerzas actuantes.

Una vez superada la velocidad del viento nominal, el equilibrio entre las fuerzas actuantes se halla en una posición del plano de giro de las aspas distinta a la

³¹ Ese es el funcionamiento de un sistema de control ideal.

³² Eje del sistema de control [Apéndice II, plano 1]

vertical, lo que provoca el rebatimiento del aerogenerador. Este movimiento hace que disminuya el área de captación de viento y, como consecuencia, la energía captada. La figura A2 muestra las fuerzas actuantes relevantes para el sistema de control.

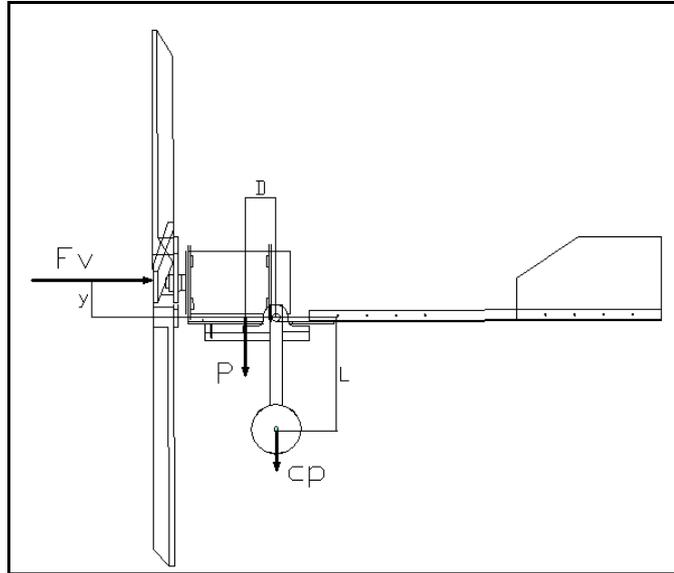


Figura A2. Fuerzas actuantes sobre el sistema de control.

Los parámetros a determinar en el diseño fueron:

- El valor del brazo de palanca contrapesante ($c_p \times L$).
- La distancia (y) entre el eje de giro de las aspas y el eje del sistema de control.
- La distancia entre el peso del aerogenerador (P) y el eje del sistema de control. Éste parámetro define la velocidad a la que comienza a actuar el sistema de control, debido a que inicialmente el momento que produce es lo único que contrapesa la acción del viento incidente.

Se modelizó matemáticamente el sistema y se definieron los parámetros antes enumerados.

Los valores utilizados son:

- $C_p \times L = 14.8 \text{ N.m}$
- $y = 70 \text{ mm}$
- $D = 27 \text{ mm}$

Adicionalmente, el sistema cuenta con la posibilidad de rebatir el aerogenerador manualmente (para el caso de condiciones climáticas extremas o falla de algún elemento).

A.1.5.5. Estructura

Para dimensionar la estructura se deben tener en cuenta dos factores: las solicitaciones de cargas (que determinan la resistencia) y las vibraciones (que determinan la rigidez). Para pequeños aerogeneradores es posible hacer el dimensionamiento teniendo en cuenta sólo las vibraciones, debido a la importancia relativa mucho mayor. Luego se verifica la resistencia estructural frente a las cargas.

El giro del rotor, principalmente, y el viento, en menor medida, generan cargas dinámicas variables que excitan a todo el conjunto. La frecuencia de excitación más importante es la debida a la fuerza centrífuga del rotor. Ésta no debe coincidir con las frecuencias naturales de la estructura debido al fenómeno de resonancia.

Existen dos alternativas de diseño:

- Realizar una torre cuyo primer modo de oscilación tenga una frecuencia mayor a la máxima frecuencia de excitación. Éstas se denominan torres duras, debido a su excesiva rigidez.
- Realizar una torre cuyo primer modo de oscilación tenga una frecuencia menor a la máxima frecuencia de excitación. Estas se denominan torres blandas. Con este tipo de torres, se logra un ahorro considerable de materiales, pero se deben verificar dos aspectos:
 - que la amplitud de la excitación a frecuencias cercanas a la natural sea pequeña
 - que los períodos de tiempo en que se produce el fenómeno de resonancia sean pequeños.

Se optó por la segunda opción, realizando los cálculos en primera aproximación por métodos clásicos de la mecánica del continuo y luego verificados por el método de elementos finitos utilizando el programa I-DEAS³³.

Los valores calculados fueron:

³³ La simulación mediante elementos finitos se realizó bajo la supervisión del Ing. Sebastián D'Hers, especialista en la materia.

- Frecuencia de oscilación del 1er modo de flexión de la estructura: 3 Hz.
- Frecuencia de excitación a velocidad de giro nominal³⁴: 251 Hz.

El hecho de que se optara por una estructura blanda facilitó el diseño del eje a través del cual pivota, el cuál es simplemente un perno.

Para evitar el aplastamiento entre el tubo principal de la estructura y el bulón - pivote, se soldó al caño un buje que distribuye los esfuerzos en el perno.

A.1.6. Sistema de adquisición de datos

Objetivos

Se desarrolló un sistema de adquisición de datos para medir distintas magnitudes físicas que permitieran:

- en la etapa de diseño:
 - realizar el estudio de anemometría
- en la etapa de ensayos:
 - comparar el funcionamiento real por el predicho teóricamente en la etapa de diseño.
 - optimizar el diseño de los distintos componentes para mejorar la *performance* del aerogenerador.

Procedimiento

Las magnitudes medidas fueron:

- velocidad³⁵ del viento
- tensión suministrada a la carga eléctrica
- potencia eléctrica útil generada

Conclusiones

El sistema de adquisición de datos desarrollado ha servido para obtener los primeros resultados de *performance* del aerogenerador.

³⁴ Se produce un ciclo de excitación cada vez que una pala realiza un giro completo.

³⁵ Estrictamente, se midió la rapidez, o módulo de la velocidad del viento. No se realizó la medición de la dirección debido a que el aerogenerador es orientable.

El almacenamiento de grandes volúmenes de información para su procesamiento posterior no es eficiente. Sería apropiado mejorar el sistema de adquisición de datos mediante el uso de una placa con un microcontrolador con mayores capacidades, es decir, que contenga ya integradas las diferentes entradas analógico / digitales, los contadores de pulso y el protocolo de transmisión de datos a la PC; de modo de realizar el procesamiento de parámetros en tiempo real.

A.1.7. Mediciones

Objetivos

- Relevar la curva potencia vs velocidad del viento.
- Evaluar el rendimiento de la hélice.
- Comprobar el funcionamiento del sistema de control.

Procedimiento

Se procesó la información que el sistema de adquisición de datos recopiló durante 72 horas (27/09/2003 al 30/09/2003). Los valores instantáneos de potencia útil generada, tensión de salida y velocidad del viento, se promediaron cada 30 segundos.

Se guardaron, además de estos valores, los registros de tiempo de los mismos. Se procedió entonces a graficar la nube de datos de potencia de salida vs velocidad del viento, que se muestra a continuación (figura A3).

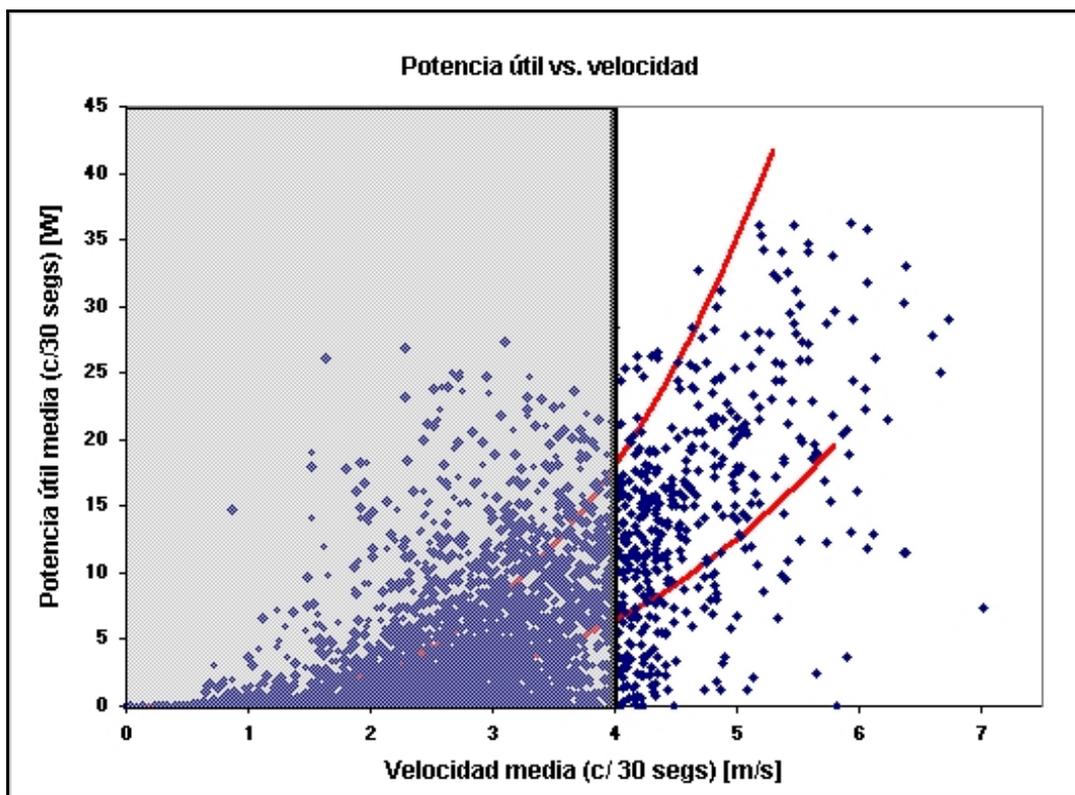


Figura A3. Curva de potencia preliminar.

Resultados

Los valores se encuentran muy dispersos debido a:

- Para velocidades por debajo de 4 m/s, luego de un período de calma más o menos prolongado, el aerogenerador pierde su inercia y deja de rotar. Para arrancar nuevamente, el viento debe superar la velocidad de corte inferior. Puede suceder el caso de que durante 30 segundos el viento sople a menos de este valor y no genere potencia. Otra alternativa se presenta cuando una ráfaga le permite arrancar, con lo que posteriores vientos menores a 4 m/s serían capaces de mantener la rotación generando energía. Es por esto que pueden presentarse valores medios de potencia muy distintos para el mismo valor medio de velocidad³⁶.
- Debido a que la potencia generada aumenta con el cubo de la velocidad, los valores por debajo de la velocidad de corte inferior tienen poca utilidad práctica.

³⁶ Esto también explica el hecho de que se genera potencia cuando la velocidad media durante un lapso de tiempo es menor que la de corte inferior.

- La dispersión existe también para valores mayores a 4 m/s. Esto es por los defasajes entre los aumentos de velocidad producidos por ráfagas, que son captadas inmediatamente por el anemómetro, y los aumentos mas lentos en la potencia generada (dada la inercia mayor de la hélice).
- Otro punto a tener en cuenta es la variabilidad del valor de resistencia que presenta el banco de cargas, debido a que está formado por lámparas incandescentes.
- Un último factor es que el anemómetro de copas capta el viento en todas direcciones sin necesidad de orientarse, mientras que el aerogenerador tiene un retardo hasta posicionarse en la dirección del viento incidente.

Rendimiento de la hélice

Se siguió el procedimiento detallado a continuación:

- Se acotaron los datos por encima de 4 m/s con dos curvas cúbicas, una máxima y una mínima.
- Se extrapoló mediante estas curvas los valores de potencia a velocidad nominal.
- Con los valores de potencia hallados, se ingresó en las curvas características del generador eléctrico para determinar el rendimiento del mismo.
- Se obtuvo entonces la potencia mecánica entregada por la hélice al generador eléctrico, con los datos obtenidos en los dos pasos anteriores.
- Conociendo la potencia del viento incidente, se pudo estimar el C_p haciendo el cociente entre: $P_{\text{mecánica}}/P_{\text{viento}}$

El rendimiento de la hélice es de:

$$C_p = 0,38 \pm 0,10$$

El error de 10% fue estimado teniendo en cuenta:

- La dispersión de los datos obtenidos con el sistema de adquisición (cúbica máxima y mínima).
- El error en las curvas características del generador eléctrico (estimado en 2%).

- La incertidumbre asociada a la variabilidad de la impedancia del banco de carga.

Conclusiones

- Se pudo relevar la curva potencia – velocidad sólo hasta valores de 6m/s., lo que produjo un gran error al extrapolar.
- El banco de carga conformado por lámparas no es adecuado para hacer estudios de *performance*, debido a su resistencia variable.
- El valor de C_p hallado contiene al valor de diseño 0,41, aunque el error es grande.
- Debido a los bajos valores de velocidad registrados, no se ha podido comprobar el punto en el cual comienza a actuar el sistema de control.

A.1.8. Conclusiones

- El proceso de diseño ha sido satisfactorio. Se puede resaltar que el aerogenerador no hace uso de un sistema multiplicador entre la hélice y el generador eléctrico. Este acople directo representa una ventaja en términos de eficiencia y costo.
- El desempeño del aerogenerador es muy bueno en términos generales. Su funcionamiento es suave, es decir, los giros vertical y del sistema de control no producen vibraciones o movimientos bruscos. Es silencioso y la torre presenta sólo oscilaciones de pequeña amplitud.
- El sistema de control no cuenta con ningún componente elástico. Esto tiene como consecuencia la disminución al mínimo de las vibraciones producidas. El funcionamiento mecánico aparenta ser adecuado, aunque son necesarios más ensayos para determinar la velocidad de viento a la que comienza a actuar y cómo es la generación de potencia para velocidades mayores.
- El proceso de mantenimiento se ve facilitado debido a la posibilidad de pivotar la torre a posición horizontal. El rebatimiento de la misma se realiza en forma sencilla y segura.
- Los ensayos preliminares de *performance* se condicen con los parámetros de funcionamiento estimados en la etapa de diseño.

- Los fondos destinados al proyecto totalizaron sólo la mitad de los presupuestados inicialmente, debido a una optimización de los costos en la etapa de diseño.
- Este proyecto, debido a su naturaleza multidisciplinaria, permitió:
 - la puesta en práctica de muchos de los conocimientos adquiridos en las distintas materias de la carrera.
 - el aprendizaje de otros conceptos y temas que no forman parte de la currícula.

A.1.9. Proyección del trabajo

Algunos aspectos que podrían desarrollarse son:

- Estudiar la factibilidad de realizar un *scale-up* del proyecto.
- Diseño de aspas de materiales más apropiados para aplicaciones de mayor potencia.
- Fabricar un generador eléctrico más eficiente, atendiendo específicamente a las necesidades del proyecto.
- Optimización del sistema de adquisición de datos, para permitir la lectura y procesamiento de las variables en tiempo real, abriendo la posibilidad a la implementación de un sistema de control mecánico / electrónico.
- Estudios más detallados de la performance del aerogenerador y el sistema de control.

A.1.10. Bibliografía

[A] - Energía eólica, diseño de aerogeneradores

[1].- Bastianón R.A. “Energía del viento y diseño de turbinas eólicas”, Ed. Tiempo de Cultura Ediciones, 1994.

[2].- Díez P.F. “Energía Eólica”, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, España, 2002.

[3].- Wood, D. “The Design and Analysis of Small Wind Turbines”, School of Engineering, University of Newcastle, Australia, 2002.

[4].- Johnson G.L. "Wind Energy Systems (Electronic Edition)", Manhattan, KS, EE.UU., 2001.

[5].- Corten G.P. "Flow Separation on Wind Turbine Blades", University of Utrecht, Holanda, 2001.

[6].- "Hipertexto Web sobre energía eólica", Universidad de Córdoba, Escuela Politécnica Superior, España, 2002.

[B] - Diseño mecánico

[1].- Faires V.M. "Diseño de mecanismos y elementos de máquinas", Ed. Limusa, 2000.

[2].- Budiansky B. Kruszewski E.T. "Transverse vibrations of hollow thin-walled cylindrical beams", NACA Report 1129, 1953.

[3].- Den Hartog J.P. "Mechanical Vibrations", Ed. Mc Graw Hill, 1940.

[4].- Seto, W. "Teoría y problemas de vibraciones mecánicas", Ed. Mc Graw Hill, 1970.

[5].- Urdiain, M.C., Álvarez, G. "Medios de representación", Ed. Alsina, 2000.

[6].- Gere J., Timoshenko S. "Mecánica de materiales", Ed. International Thompson Editores, 1998.

[7].- Falco O.A. Lauría E.H. "Apuntes de mecanismos", Ed. CEI, 1959.

[C] – Mecánica de los fluidos

[1].- Streeter V.L., Wylie B.E., Bedford K.W. "Mecánica de los fluidos", Ed. Mc Graw Hill, 2000.

[D] – Electrónica y microcontroladores

[1].- Angulo Usategui, J.Ma., Angulo Martínez I. "Microcontroladores PIC, diseño práctico de aplicaciones", Ed. Mc Graw Hill, 1999.

[2].- Tavernier C. "Microcontroladores PIC", Ed. Paraninfo, 1997.

[3].- Ryder J. "Electrónica, fundamentos y aplicaciones", Ed. Aguilar, 1972.

[E] – Electrotecnia

[1].- Chapman S.J. “Máquinas eléctricas”, Ed. Mc Graw Hill, 2000.

[2].- Langsdorf A.S. “Teoría de las máquinas de corriente alterna”, Ed. Mc Graw Hill, 1953.

[3].- Gray A.R. “Máquinas eléctricas”, Ed. Eudeba, 1965.

[F] – Estadística Aplicada

[1].- García R. “Apuntes de clase de Estadística Aplicada”, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, 2003.

[2].- Devore J.L. “Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias”, Ed. Thompson, 2001.

A.2. Proyecto micro aerogenerador. Evolución I.

A.2.1. Introducción

El relevamiento experimental de la curva de potencia de aerogeneradores es un tema de intensas investigaciones actuales. La misma permite caracterizar y comparar distintos equipos, estimar la producción de energía dado un perfil de viento y es una fuente importante de información para introducir mejoras tendientes a optimizar los sistemas eólicos.

Las principales dificultades asociadas a la determinación de la curva de potencia son [IEC, Gipe, Pedersen, Piggott]:

- Las curvas obtenidas in situ difieren de las relevadas mediante ensayos de laboratorio, debido a los efectos dinámicos que producen los perfiles de viento.
- Los resultados son distintos según el instrumental utilizado (principalmente el anemómetro y su calibración).
- Éstos también se ven afectados por los métodos utilizados en el procesamiento de los datos.
- Existen diversas normativas al respecto (IEC, AWEA, IEA, etc.), todas en permanente revisión, pero no existe un consenso internacional sobre las metodologías a utilizar ni sobre la definición técnica de los distintos parámetros.

Existen dos complicaciones adicionales en el caso de los pequeños aerogeneradores: la curva de potencia también depende fuertemente de la carga aplicada y del sistema de control utilizado [Corbus et. al.].

Como ejemplo, se puede citar el hecho que en los EE.UU. ningún fabricante de pequeños aerogeneradores certifica las curvas de potencia y sólo recientemente ese país cuenta con laboratorios acreditados para realizar los ensayos de acuerdo a normas. Esto tiene como consecuencia que cada empresa realice sus propias mediciones y es frecuente que estudios posteriores hechos por agentes independientes verifiquen sistemáticamente que los equipos no alcanzan las especificaciones dadas por los proveedores [Gipe].

Por todo lo expuesto anteriormente, el presente año se decidió desarrollar un sistema de adquisición de datos propios para poder relevar la curva de potencia del micro aerogenerador del ITBA.

Se comenzó además con un proceso de rediseño mecánico, con el objeto de introducir mejoras en el equipo en base a observaciones hechas sobre el funcionamiento del mismo.

Hasta la fecha, ambos objetivos se han cumplido en forma parcial. A continuación se describen los desarrollos hechos hasta el momento y las conclusiones obtenidas.

A.2.2. Desarrollo

A.2.2.1. Sistema de adquisición de datos

Para relevar la curva de potencia de un aerogenerador es necesario medir:

- Velocidad y dirección del viento
- Orientación del aerogenerador
- Potencia activa instantánea generada

Se decidió medir además, los siguientes parámetros, para obtener información respecto del funcionamiento del sistema de control, los rendimientos aerodinámicos y electromecánicos del equipo y el comportamiento estructural de la torre.:

- Ángulo de inclinación (*tilt* vertical) del sistema de control
- Velocidad de giro de hélice
- Frecuencia de vibración de la torre

Las señales proporcionadas por los distintos sensores fueron acondicionadas mediante placas de adquisición de datos, y posteriormente interpretadas y almacenadas con un microcontrolador Motorola® MC68HC11A1FN.

Debido a lo expresado en la introducción respecto a la multiplicidad de normativas relativas a los procedimientos de ensayo para relevar las curvas de potencia no estaba claro qué recomendaciones seguir.

Aprovechando el generoso consejo de Troels Friis Pedersen, investigador del Riso National Laboratory³⁷ y experto en aerogeneradores y anemometría, hemos seguido las recomendaciones de la norma IEC-61400-121 CDV³⁸.

A.2.2.1.1. Velocidad y dirección del viento

Se utilizó un anemómetro Davis[®] de copas. Para medir la velocidad se utilizó la misma placa de adquisición de datos ya desarrollada en el 2003, junto con un programa en lenguaje Assembler para el microcontrolador. Este conjunto envía periódicamente (se puede elegir la frecuencia de muestreo) los datos de la velocidad del viento a la PC.

La dirección se midió utilizando el potenciómetro incorporado del anemómetro. El mismo varía su resistencia entre 0 y 18 k Ω . Fue necesario diseñar una placa para el acondicionamiento de la señal (Anexo I, figura I.1) y posterior envío al conversor A/D del microcontrolador.

A.2.2.1.2. Orientación del aerogenerador respecto al viento

Se utilizó el mismo sistema que para medir la dirección del viento. Para esto se retiró un reóstato de otro anemómetro de las mismas características y se fabricó un adaptador mecánico para poder colocarlo en el aerogenerador.

A.2.2.1.3. Potencia activa instantánea generada

Se utilizó el circuito integrado ADE7755AN de Analog Devices[®]. El mismo tiene dos entradas analógicas.

En la primera de estas entradas se colocó una resistencia de 0.6 Ω y 5 W en serie con la carga para lograr una señal proporcional a la corriente. En la segunda se colocó un divisor de tensiones en paralelo con la carga para obtener una señal proporcional a la tensión. El CI multiplica ambas entradas y da como salida una señal de onda cuadrada cuya frecuencia es proporcional a la potencia sobre la carga.

³⁷ El Riso National Laboratory, organismo estatal dependiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación danés, realiza investigaciones en diversas áreas, entre ellas la energía eólica. Es uno de los pocos institutos europeos habilitados para certificar turbinas eólicas y colabora en forma permanente en la redacción de normativas referidas al tema.

³⁸ La norma, del IEC-TC 88, denominada "Wind Turbines – Part 121: Power performance measurements of wind connected wind turbines", que contiene un anexo H referido a pequeños aerogeneradores, es un *draft* muy reciente que va a ser finalmente publicado en el 2005. Los autores agradecen al especialista, quien envió una copia de la norma.

Se codificó un programa que realiza un promedio de la potencia generada durante un intervalo de tiempo (regulable) y envía este valor a la PC.

A.2.2.1.4. Ángulo de inclinación del sistema de control

Se utilizó un acelerómetro de Analog Devices® ADXL105JQC³⁹.

Características técnicas:

- Rango de medición: +/-5 g.
- Tipo de salida: Analógica.
- Señal de salida: 0-5 V.
- Resolución: 2 mg.
- Un solo eje de medición.

Se acondicionó la señal de salida del acelerómetro (figura B.2) de modo de tener una medición de 0V en 0g (cuando el aerogenerador se encuentre en posición horizontal) y de 5V en +g (cuando se encuentre en posición vertical, completamente rebatido), teniendo entre estos dos extremos todas las posiciones de rebatimiento o *tilt* cubiertas.

A.2.2.1.5. Velocidad de giro de la hélice

Se colocó un sensor de efecto Hall en la carcasa del generador eléctrico. El mismo detecta la presencia de un imán que fijó al plato de agarre de las aspas, generando un pulso eléctrico por cada vuelta completa de la hélice. Se codificó un programa capaz de medir el período de la onda emitida por el sensor. De esta manera se obtiene la velocidad de rotación del aerogenerador.

A.2.2.1.6. Frecuencia de vibración de la torre

Se utilizó un acelerómetro de Analog Devices® ADXL210JE⁴⁰.

Características técnicas:

- Rango de medición: +/-10 g.
- Tipo de salida: Digital. PWM.

³⁹ Cedido gentilmente por Gonzalo Salgueiro (alumno del instituto) para el proyecto.

⁴⁰ Cedido gentilmente por Pablo Vázquez (alumno del instituto) para el proyecto.

- Resolución: 2 mg.
- Tipo de integrado: Montaje superficial.
- Medición en dos ejes perpendiculares.

Para poder interpretar las señales del acelerómetro fue necesario realizar una placa de adquisición de datos (figura B3). Se diseñaron los parámetros del sistema de modo de lograr un período de 8.8 ms del PWM de salida. Se codificó un programa para el microcontrolador que mide el *duty cycle* de cada señal (la del eje X y la del eje Y) y la envía periódicamente a la PC.

A.2.2.1.7. Discusión

Sistemas de adquisición (placa construida y programa codificado) en funcionamiento:

- De velocidad y dirección del viento.
- De potencia.
- De velocidad de giro de la hélice.

Falta codificar los programas para medir:

- Ángulo de inclinación del sistema de control.
- Orientación del aerogenerador (sería muy similar al usado para medir la dirección del viento).
- Las vibraciones de la torre.

Resta realizar además un ensamble de todos los códigos hechos de manera de transformarlos en un único módulo (hasta ahora fueron realizados en forma independiente) y poder así compilarlo y programar el microcontrolador.

A.2.2.1.8. Conclusiones

Una vez terminado el sistema de adquisición de datos y codificado el software en PC⁴¹ se procederá a relevar la curva de potencia y otros datos referidos al funcionamiento del aerogenerador. Esta información será de vital importancia

⁴¹ Los autores agradecen enormemente a la Fundación Techint, quienes donaron una computadora para poder realizar los ensayos al aerogenerador.

para estudiar en forma más detallada al equipo y poder así definir los pasos a seguir en términos de optimización de diseño.

A.2.2.2. Rediseño mecánico

En base a observaciones sobre el funcionamiento del conjunto, a dificultades encontradas cuando se realizaban tareas de mantenimiento y montaje de sensores y atendiendo a las tendencias actuales en el diseño de aerogeneradores [Tangler] se procedió a relevar cada aspecto del diseño mecánico original y así decidir las acciones de mejora correspondiente.

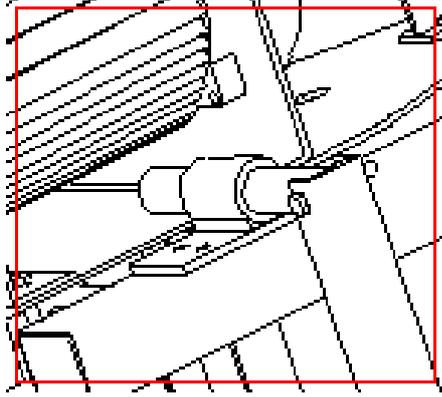
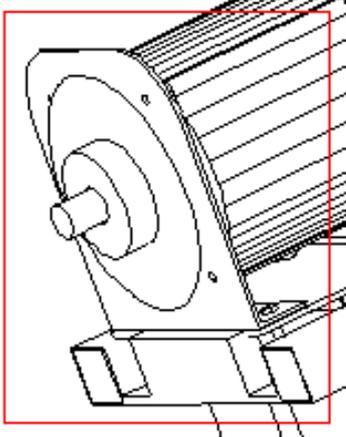
Aspectos evaluados como positivos del diseño original, que se han mantenido en el rediseño:

- El funcionamiento del sistema de control es aceptable. El rebatimiento o *furling* es suave, sin embargo, estando con algún ángulo de inclinación si la velocidad del viento disminuye súbitamente el retorno a la posición horizontal se produce a veces en forma brusca, provocando un impacto en los apoyos. Este fenómeno producido en las turbinas pequeñas de eje horizontal está siendo estudiado actualmente [Narayana]. Se ha previsto la inclusión de un sistema amortiguador, pero para poder dimensionarlo en forma adecuada será necesario contar con los resultados de los ensayos correspondientes.
- El sistema de dos placas de agarre sujeta correctamente el generador eléctrico y no requiere de reajustes periódicos.
- La orientación del rotor debido a la acción de la veleta es apropiada. No se observan giros violentos ante cambios de dirección del viento súbitos, ni retardos excesivos. Los correspondientes ensayos permitirán evaluar la posición óptima de la veleta.

Características que fueron revisadas y mejoras introducidas:

Tabla 1 – Mejoras introducidas en el rediseño mecánico

Situación actual	Rediseño
Debido a la forma en que fue construido el sistema de contrapesos, ante una necesidad de recambio de los rodamientos del sistema de control, habría que amolar al menos una soldadura (figura 1). No es aceptable tener que cortar una soldadura para realizar esta tarea de mantenimiento.	Las barras que sostienen los contrapesos cuentan con un agujero por donde son sujetadas a los ejes de giro horizontal mediante un perno (figura 2). De esta manera se elimina el problema de tener que cortar las piezas para cambiar los rodamientos.

 <p>Figura 1.- unión actual entre barras de contrapeso y rodamientos</p>	 <p>Figura 2.- unión propuesta mediante perno</p>
<p>El sistema de giro del sistema de control hace uso de rodamientos. Éstos, si bien son estándar en la industria (facilitando su reemplazo) se oxidaron en menos de un año y son subutilizados debido a que el sistema de control no actúa en forma permanente.</p>	<p>Los rodamientos se reemplazaron por cojinetes, que son más baratos y más adecuados al régimen de funcionamiento. Para poder cambiarlos, los cojinetes van sujetos a la placa horizontal (figura 2). Cuentan con orificios para lubricación</p>
<p>En el sistema de sujeción del generador eléctrico, el plato delantero es fijo (figura 3) y el trasero móvil. Por ende para retirar el generador deben ser desenroscadas las varillas.</p>  <p>Figura 3 – plato de sujeción delantero fijo</p>	<p>Ambos platos son móviles (atornillados a la base), por lo que la unidad generador-platos-varillas puede ser retirada en forma conjunta, simplificando la operación (figura 4).</p>  <p>Figura 4 – plato de sujeción delantero móvil</p>
<p>Se utilizan numerosas medidas distintas de pernos.</p>	<p>Se redujo a sólo dos medidas estándar.</p>

A.2.2.2.1. Conclusiones

El proceso de optimización del diseño mecánico es un proceso iterativo que puede realizarse en forma metódica, pero para poder realizar cambios fundamentados no sólo en la observación o características cualitativas, es necesario contar con los datos de los ensayos a ser realizados oportunamente y de análisis cuantitativos (por ejemplo, mediante modelado) de los diversos componentes.

Se prevé además la adquisición de la norma IEC-61400-2:1996 “Wind turbine generator systems – Part 2: Safety of small wind turbines”, referida a los aspectos de seguridad a tener en cuenta en el diseño, construcción, montaje, operación y mantenimiento de pequeños aerogeneradores.

A.2.2.3. Modelado de las aspas

Se comenzó con el modelado de las aspas para cuantificar las sollicitaciones mecánicas a las que está sometido el rotor de la hélice.

Se ha concluido con el diseño 3D del modelo. El sólido (aspa) fue desarrollado en tres etapas. Primeramente, se generó mediante interpolación por splines el contorno del perfil (Wortmann FX 63-137). Luego se replicó el mismo en 7 secciones equiespaciadas (desde la raíz a la punta del aspa), cada uno con la cuerda y el alabeo correspondientes⁴². Por último, se conformó el sólido mediante una función de ajuste (*lofting*) incorporada en el programa que une todas las secciones utilizando como guía la recta que une los centros aerodinámicos de las mismas (figuras 5.a y 5.b).

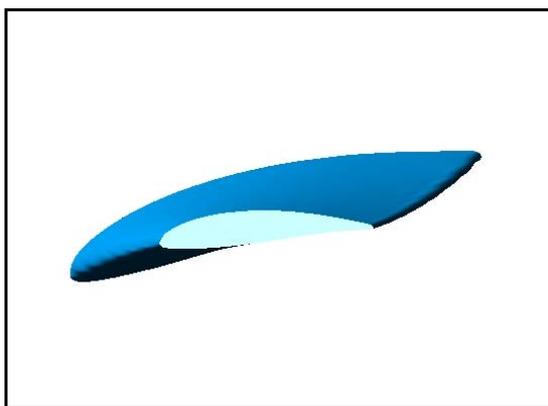


Figura 5.a – vista frontal del aspa

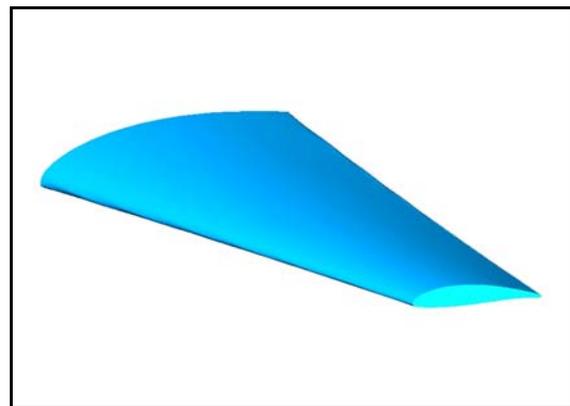


Figura 5.b – perspectiva isométrica

⁴² Se midieron éstos parámetros en la hélice actual, que fue fabricada con precisión (error <5%), y por ende no difieren significativamente de los de diseño.

A.2.2.4 Ensayo del generador eléctrico

El primer banco de carga desarrollado consistía en un conjunto de lámparas incandescentes de baja tensión y potencia. Las diversas configuraciones del banco permitían variar la impedancia equivalente nominal del conjunto. De esta manera fue posible determinar mediante un ensayo del generador eléctrico la impedancia de máxima transferencia de potencia.

Se dispuso el banco de lámparas de modo que tuviera este valor óptimo. Sin embargo, debido a las características no lineales de la impedancia de las lámparas (por el calentamiento del filamento), sólo presentaban este valor en forma nominal (a plena carga). Además su impedancia es levemente reactiva.

Se procedió entonces a ensayar nuevamente el generador utilizando un reóstato que tiene las siguientes características (figura 6):

- Su impedancia (totalmente resistiva) puede ser variada linealmente mediante el desplazamiento de un cursor, desde corto circuito ($\cong 0 \Omega$) hasta $9,9 \Omega$, rango conveniente dadas las características del generador eléctrico.
- Dada una posición del cursor, la impedancia prácticamente no varía con la corriente, debido a que disipa adecuadamente el calor generado.
- Los valores admisibles de corriente superan (10 A durante 15 minutos, 8 A en forma constante) los valores de corriente que proporciona el aerogenerador.

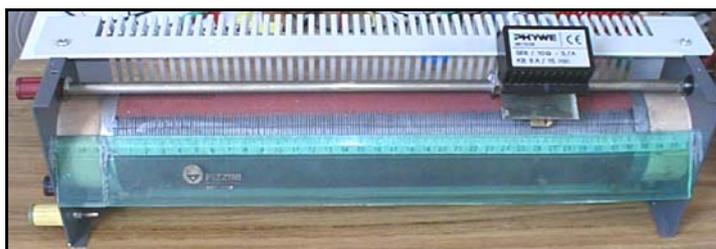


Figura 6 – reóstato de carga

El ensayo se realizó a 300 , 500 y 800 rpm y la resistencia se varió desde $0,9 \Omega$ a 9Ω con intervalos de $0,9 \Omega$ en todos los casos. Se muestran los resultados (figura 7) obtenidos para el ensayo a 800 rpm y el polinomio de grado 4 de aproximación por regresión por mínimos cuadrados. La impedancia de máxima transferencia de potencia se obtiene para un valor de $1,84 \Omega$ obteniendo una potencia de 104 W . Estos valores están en acuerdo con los obtenidos en el ensayo realizado en el 2003 .

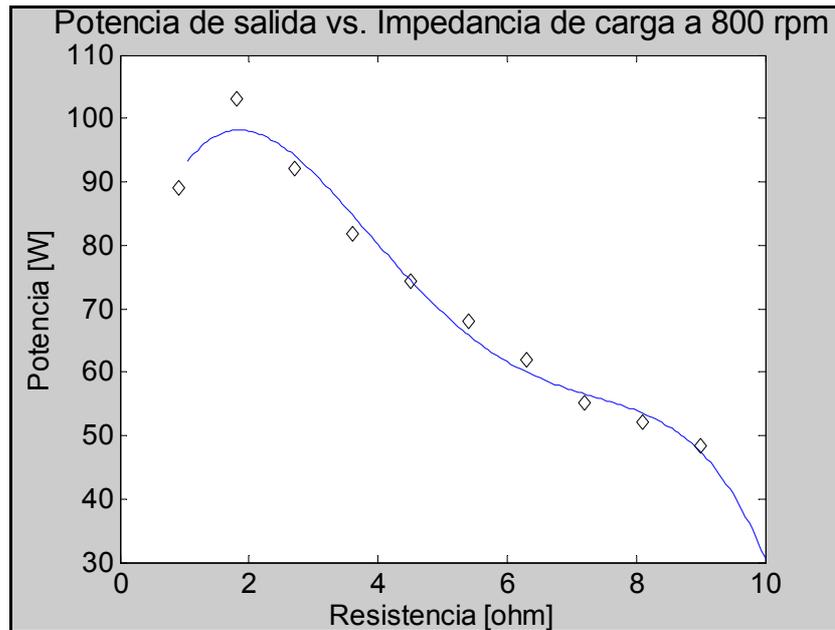


Figura 7 – ensayo del generador eléctrico

A.2.2.4.1 Conclusiones

Contar con un nuevo banco de carga lineal ayudará a producir mejores resultados cuando se realicen los ensayos del sistema, debido a que no será un parámetro de influencia al momento de relevar por ejemplo, la curva de potencia, ya que como se dijo, ésta depende entre otras cosas de la carga aplicada y sus características.

A.2.3. Conclusiones

“La curva de potencia es la característica más importante de una turbina eólica” (Riso National Laboratory, Dinamarca)

“La curva de potencia es una de las más importantes características de un aerogenerador” (Windtest, Alemania)

“El relevamiento de la curva de potencia es el estudio más importante para decidir la economía de un proyecto eólico.” (Centre for Wind Energy Technology, India)

El estudio de la curva de potencia de aerogeneradores es un tema abierto. Se realizan tanto desarrollos experimentales como investigaciones en modelos predictivos. Existen laboratorios, institutos y organismos oficiales que cuentan en sus planteles con profesionales abocados a la temática. Muchos de los *papers* publicados en *journals* y congresos de energía eólica se refieren a ella.

Todavía no existe una normativa definitiva y si bien las curvas de los grandes aerogeneradores son certificadas, distinto es el caso de las pequeñas turbinas.

En el presente informe se han presentado los resultados obtenidos hasta la fecha y se estima que en un futuro próximo se contará con el sistema de adquisición de datos terminado y ensayos realizados que permitirán determinar, entre otras cosas, la curva de potencia del aerogenerador instalado en el ITBA

A.2.4. Referencias

- [1] A. C. Ayestarán, J. A. Bodoira y N. Zimmermann “Diseño, construcción y ensayo de un micro aerogenerador”, Concurso de Iniciación en Investigación y Desarrollo, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, 2003.
- [2] IEC-61400-121 CDV “Wind Turbines – Part 121: Power performance measurements of wind connected wind turbines”, 2003.
- [3] P. Gipe “Testing the power curves of small wind turbines”, <http://www.wind-works.org/articles/PowerCurves.html>, 2000.
- [4] P. Gipe “Comments on a proposed performance Standard for small wind turbines”, <http://www.wind-works.org/articles/SWTStandard.html>, 2000.
- [5] T. F. Pedersen “Power curve measurement under influence of skew airfoil and turbulence”, Measurement Engineering Australia, 2002.
- [6] H. Piggott “Power performance testing” <http://homepages.enterprise.net/hugh0piggott/powertest/index.htm>, 1990.
- [7] D. Corbus, C. Newcomb, E.I. Baring-Gould y S. Friedly “Battery voltage stability effects on small wind turbine energy capture”, National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [8] J. Tangler “The evolution of rotor and blade design”, National Renewable Energy Laboratory, 2000.
- [9] M. Narayana “Catastrophic failure due to gyroscopic effect of small scale tilt up horizontal axis wind turbines”, National Engineering Research & Development Centre of Sri Lanka, 1999.
- [10] N. Storey “Eléctronica, de los sistemas a los componentes”, Ed. Addison-Wesley Iberoamericana S.A. 1995.
- [11] Spasov “Microcontroller Technology: The HC11”, Ed. Prentice Hall, 1996.

A.2.5. Apéndice – Esquemas de las placas de adquisición de datos

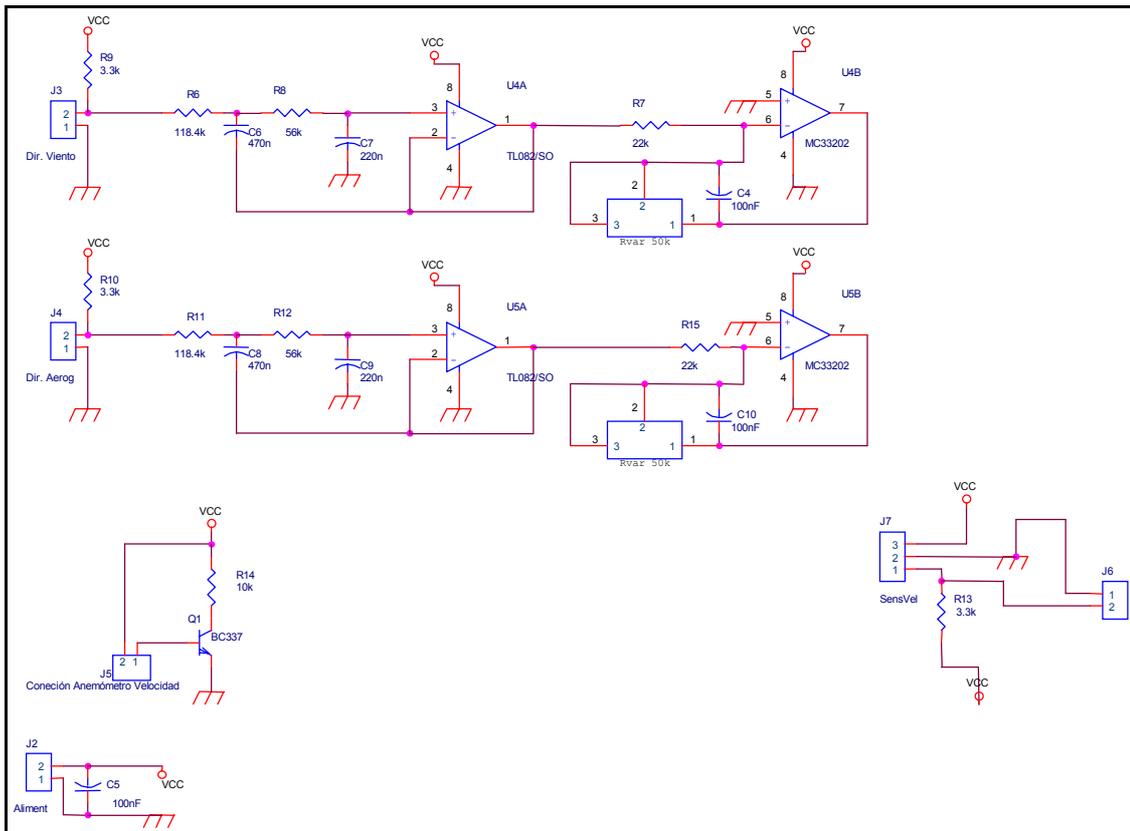


Figura B1 - Placa de acondicionamiento para medir: dirección y velocidad del viento, orientación del aerogenerador y velocidad de giro de la hélice.

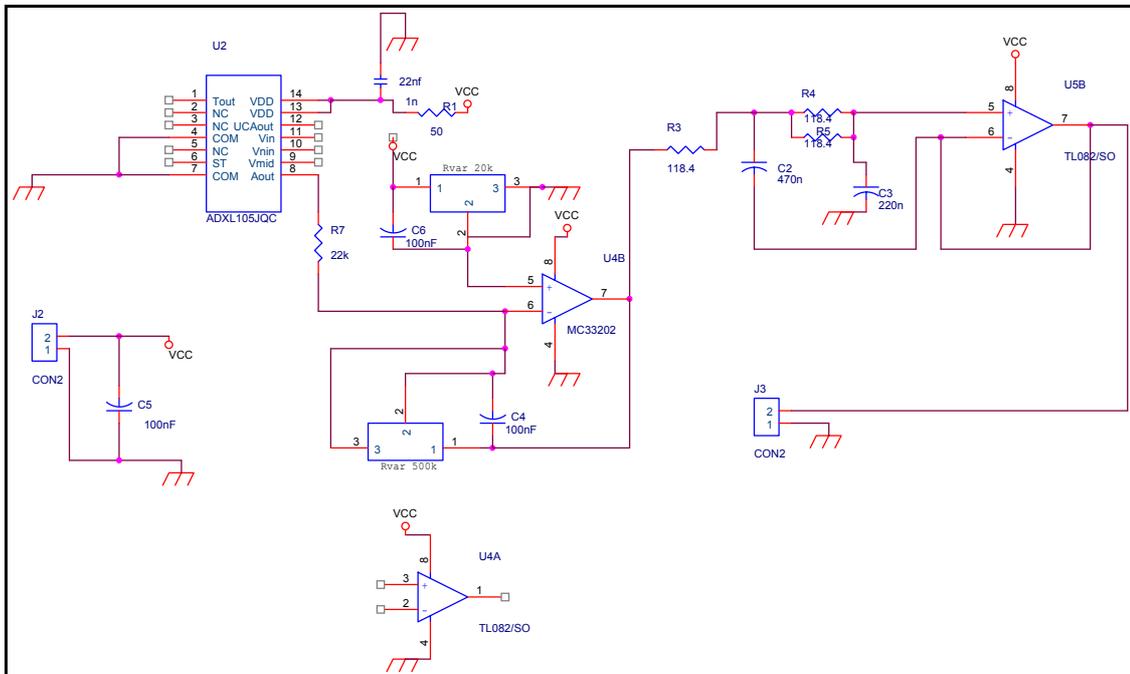


Figura B2: Acelerómetro para medir ángulo de inclinación o *tilt*.

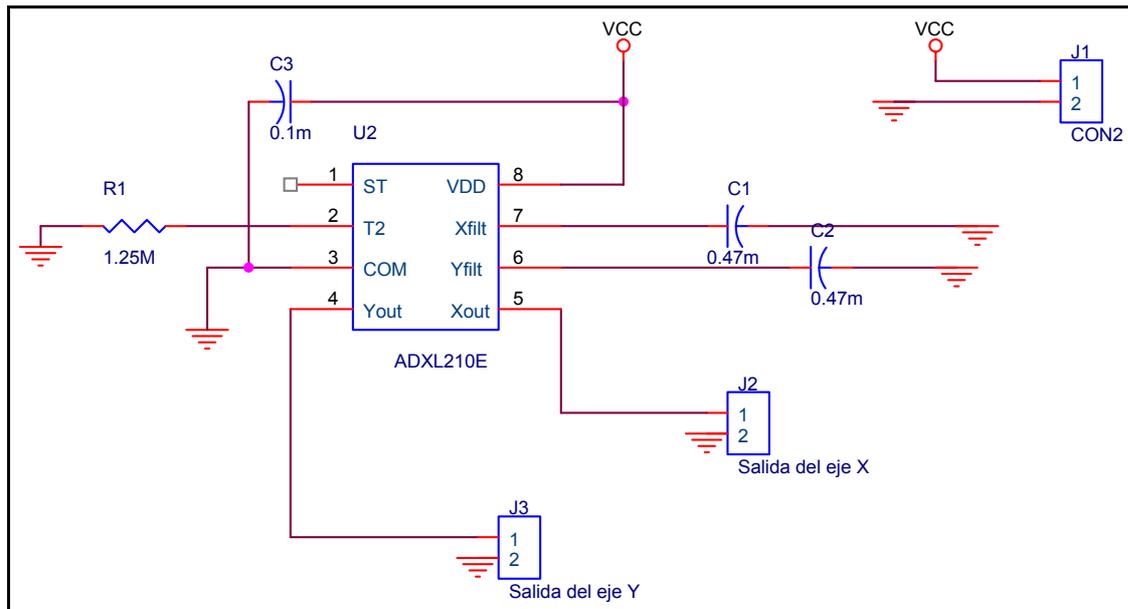


Figura B3 - Acelerómetro para medir vibraciones.

A.3. Producción y almacenamiento de hidrógeno.

A.3.1. Resumen

El desarrollo de tecnologías cada vez más simples, seguras y eficientes para la producción y el almacenamiento del hidrógeno es condición necesaria para la instalación del hidrógeno como vector energético. En este trabajo se estudia experimentalmente la producción de hidrógeno a alta presión por electrólisis de soluciones alcalinas sin la intervención de sistemas compresores y su almacenamiento directo en contenedores intrínsecamente seguros.

Las pruebas realizadas muestran que el proceso de electrólisis a alta presión no solo es factible, sino que además posee mejor rendimiento que el de la electrólisis a baja presión.

Los ensayos de funcionamiento realizados con un prototipo demostraron que es posible solucionar los problemas de hermeticidad, separación de gases y control, con tecnología relativamente simple.

Los estudios y pruebas preliminares indican que el sistema contenedor que se propone presenta inmunidad al estallido y versatilidad de forma y tamaño, sin embargo para alcanzar o superar la eficiencia de almacenamiento de los sistemas convencionales se deberán realizar las inversiones necesarias para poder extrudar y trefilar aleaciones de aluminio de alta resistencia.

A.4. Fotografías del aerogenerador y el electrolizador



Figura C1. Aerogenerador instalado en el ITBA.



Figura C2. Prototipo electrolizador de alta presión.



Figura C3. Cabina de seguridad para el electrolizador.