

**CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Propuesta de Proyecto de Tesis Doctoral

**Título: Dimensionado de Sistemas Integrados de Energía
Eólica e Hidrogeno**

**Aspirante: M.Sc. Geovanni Hernández Gálvez
e-mail: geovannisg@yahoo.com**

**Director de Tesis:
Dr. Sebastian Pathiyamattom Joseph
Inv.Titular. CIE. UNAM**

PROPUESTA DE PROYECTO DE TESIS DOCTORAL

1. Título. Dimensionado de Sistemas Integrados de Energía Eólica e Hidrógeno.

2. Introducción.

La energía se ha convertido en una necesidad básica de la sociedad moderna en todas las dimensiones imaginables. Es difícil imaginar a la industria, transporte, comunicaciones, agricultura moderna y otras actividades sin energía. A nivel doméstico, en las zonas urbanas donde se cuenta con electricidad, una serie de artefactos hacen más simples las tareas. En las zonas rurales sin acceso a la electricidad, la biomasa permite satisfacer necesidades básicas como la cocción de alimentos, o el uso de la fuerza animal para la agricultura y el transporte.

El carbón, petróleo y gas natural (hidrocarburos) son las fuentes principales de energía de las cuales dependemos en gran medida. Sin embargo, las evidencias de que su agotamiento va por senda irreversible son cada vez más abundantes y contundentes. En efecto, los planificadores más optimistas creen que el petróleo se agotará en unos 40 a 50 años. Pero antes de tal agotamiento debemos esperar que se hayan provocado varias otras crisis y los precios hayan subido substancialmente, a menos que antes de eso se encuentre un sustituto adecuado a esta fuente de energía.

Las fuentes renovables de energía han surgido como una respuesta alternativa. Durante las tres últimas décadas se han producido enormes avances, no solamente en lo tecnológico sino también en generar las condiciones adecuadas para su diseminación. Especialmente en los países desarrollados se están haciendo grandes esfuerzos por introducir estas nuevas fuentes, por bajar sus precios y hacerlas competitivas vía incentivos. Es así que las industrias energéticas de mayor crecimiento durante la última década han sido, precisamente, las energías solar y eólica con crecimientos superiores al 20% anual.

Durante esta última década ha surgido un importante interés por la promoción de las llamadas celdas de combustible, también llamadas pilas de combustible por su similitud con las baterías. El uso del hidrógeno como combustible no es una novedad en el mundo. Viene utilizándose desde hace décadas en la industria satelital. Sin embargo, en la actualidad y a la luz de la realidad cada vez más clara del agotamiento del petróleo, las celdas de combustible resultan sumamente importantes en especial para sustituir a los hidrocarburos en el transporte. El transporte requiere de fuentes de energía fácilmente transportables con alto rendimiento por unidad de energía primaria. El hidrógeno, a diferencia de las otras fuentes alternativas de energía renovables, es de fácil almacenamiento y transportación por ser un “fluido de poco peso”, y por tanto tiene un enorme potencial para ser utilizado como fuente de energía en el transporte.

Otro tema importante relacionado con las celdas de combustible es que el hidrógeno, fuente de energía para el uso de estas celdas, se encuentra en forma

abundante en el universo, aunque no en forma libre. Se puede extraer de la naturaleza, y si se tiene la tecnología para su separación de los productos primarios, ésta es una fuente inagotable de energía.

Tales características del hidrógeno y las celdas de combustible hoy por hoy la han convertido en una de las alternativas que más trascendencia está teniendo en los países desarrollados. Estados Unidos, Europa, Japón han iniciado importantes programas de desarrollo e investigación. La empresa privada, y en especial los grandes fabricantes automotrices como General Motors, Chrysler, BMW, también están desarrollando sus propios programas de investigación con la finalidad de colocar en el futuro cercano vehículos a hidrógeno en el mercado mundial, inclusive con vehículos ya en funcionamiento como casos piloto.

Islandia, en una mirada estratégica, está haciendo una millonaria inversión en la conversión de su transporte público a un transporte en base a hidrógeno, convirtiéndose tal vez en la primera economía de hidrógeno en el mundo. La dificultad y el costo de su producción están precisamente en separarlo de las fuentes primarias. En la actualidad se conocen dos formas de producción de hidrógeno: por reformación, en la cual éste es obtenido de los hidrocarburos, separando el carbono del hidrógeno (uno de los más utilizados es el gas natural); y otra forma de obtenerlo es por electrólisis del agua, siendo la segunda opción más costosa que la primera. Otro aspecto que lo presenta quizás un tanto complicado o costoso es el hecho de que la producción del hidrógeno a partir de la materia primaria (hidrocarburos o agua) necesita de importantes cantidades de energía.

Aquí surge una importante pregunta: ¿Dónde está el negocio si vamos a invertir energía para obtener lo mismo?, ¡más aun si contamos con que los procesos de transformación producen pérdidas de energía (eficiencia de los procesos)! La respuesta es que para producir una fuente de energía de alto valor energético y además transportable, vale la pena utilizar otras fuentes que en muchos casos existen en abundancia pero que no son transportables, como la solar, eólica e hidráulica.

La producción de hidrógeno a partir de fuentes de energías renovables, es sin dudas, un aspecto a tener en cuenta dentro del lanzamiento real de este gas como “vector energético” del futuro, dentro de una sociedad que demanda, cada vez más, un “desarrollo sostenible”. Ha de tenerse en cuenta que el hidrógeno es, o no, una fuente limpia de energía en función de su procedencia.

Se habla con frecuencia de la bondad del hidrógeno como vector energético, o de las celdas de combustible como un dispositivo para transformar el hidrógeno en electricidad; de este modo es habitual asociarlos al término “energías renovables”, aunque esto no sea siempre del todo exacto.

Así, el hidrógeno será o no “limpio” en la medida en que lo sea su producción, y las celdas de combustible serán o no una fuente de energías renovables, en tanto que lo sea el combustible que las alimenta.

3. Antecedentes y estado actual de la temática.

Estudios recientes consideran que el uso de los combustibles fósiles no es sustentable en el tiempo, tanto por su agotamiento como por los efectos directos sobre el medio ambiente y el cambio climático. Los planificadores más optimistas creen que el petróleo se agotará en unos 40 a 50 años. El reemplazo de estos combustibles por recursos energéticos renovables, autóctonos y de bajo efecto sobre el ambiente, en particular los recursos solar y eólico, ya está ocurriendo y será aun mayor en los próximos años en todo el mundo.

Durante las tres últimas décadas se han producido enormes avances, no solamente en lo tecnológico sino también en crear las condiciones adecuadas para su diseminación. Especialmente en los países desarrollados se han realizado grandes esfuerzos por introducir estas nuevas fuentes, por reducir sus costos y hacerlas competitivas a través de incentivos. Es así que las industrias energéticas de mayor crecimiento durante la última década han sido la solar y la eólica, con crecimientos superiores al 20 % anual.

Una de las características intrínseca de estos recursos energéticos renovables, que los diferencia de los combustibles fósiles de manera sustancial, es su variabilidad espacio-temporal, que resulta difícilmente previsible.

Recientemente han aparecido nuevas opciones estratégicas para el desarrollo del mercado eólico mundial. Entre ellas aparecen las ***instalaciones “offshore”*** (instalaciones eólicas en el mar), ***el repowering*** (sustitución de máquinas de media potencia por máquinas de nueva generación, del orden de 1 MW) y la **combinación de energía eólica con tecnologías de celdas de combustibles y la producción de hidrógeno.**

La utilización de la energía eólica para producir hidrógeno es un tema que ha provocado la realización de actividades de investigación-desarrollo en varias instituciones científicas del mundo, entre las que se encuentran: El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Washintong, el Centro de Investigaciones de Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos de América, etc.

En Pico Truncado (Santa Cruz, Argentina), se puso en marcha la construcción de una planta experimental traccionada con energía eólica convertida en hidrógeno. Otros países como Alemania, Francia, Italia, Japón, Canadá, Estados Unidos, Islandia, España, Noruega, China, Corea y Singapur dedican grandes esfuerzos al dominio del hidrógeno como combustible.

Otros países como Alemania, Francia, Italia, Japón, Canadá, Estados Unidos, Islandia, España, Noruega, China, Corea y Singapur dedican grandes esfuerzos al dominio del hidrógeno como combustible.

Recientemente se inició la ejecución del proyecto europeo *RES2H2: Una Demostración de la Integración de Fuentes de Energías Renovables con el “Vector Hidrógeno”* que con escenarios en España y Grecia, pretende evaluar la viabilidad a escala industrial de la producción limpia de hidrógeno, utilizando en este caso la energía eólica como fuente energética^[4].

En Noruega se inauguró la primera planta de producción de hidrógeno a partir de la energía producida por aerogeneradores, para la electrificación de una pequeña isla (Utsira), con unos 200 habitantes. Algunas imágenes de esta instalación demostrativa se muestran a continuación^[5].



Fig.1. Sistema eólico/hidrógeno instalado en Utsira, Noruega.

4. Hipótesis.

Como hipótesis se defiende la siguiente idea: Si el dimensionado de sistemas integrados de energía eólica e hidrógeno se realiza a partir de la modelación y simulación con un enfoque sistémico, se logra optimizar dicho proceso, viabilizando la implementación de tales sistemas y la producción de hidrógeno limpio como vector energético del futuro.

5. Justificación.

Aunque han sido desarrollados varios trabajos de investigación relacionados con los sistemas integrados de energía eólica e hidrógeno, no existe aún una metodología que permita realizar de forma óptima el dimensionado de tales sistemas.

Se han desarrollado varios proyectos sobre todo en la parte de simulación de sistemas, algunos de los cuales se relacionan a continuación:

- Desarrollo de un sistema eólico/hidrogeno en Dunkerque (Francia, simulación).
- Estudio de un sistema eólico/hidrogeno aislado (Noruega, ideas generales sobre dimensionado de sistemas).
- Almacenamiento de energía eólica por medio de hidrogeno (Irlanda, simulación).
- Optimización de un sistema eólico/hidrogeno integrado a una minired diesel (Australia, simulación).
- Almacenamiento de hidrogeno en torres de turbinas eólicas. Consideraciones de diseño. (NREL, Estados Unidos de América).
- Sistema eólico/hidrogeno para áreas remotas. Caso de estudio. (Noruega, estudio técnico económico preliminar).

Como resultado de ellos, han sido identificados varios retos que deben enfrentar las actividades de investigación-desarrollo para lograr dimensionamientos óptimos de los sistemas integrados de energía eólica e hidrogeno, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- ¿Cómo influyen en el dimensionado del sistema las condiciones variables del viento?
- ¿Cómo influye la demanda variable de hidrogeno?
- ¿Cómo influyen las características operacionales del electrolizador (p.e. límite en el número de arranques/paradas)?
- ¿Cómo influyen los efectos de envejecimiento y degeneración?

Estos constituyen, sin dudas, elementos que deben ser valorados durante el dimensionado de tales sistemas y que demandan la realización de actividades de investigación que permitan solventarlos.

Todos los aspectos hasta aquí relacionados constituyen la base, y la justificación, para la realización del proyecto doctoral que se propone, cuyos objetivos aparecen de forma explícita en lo adelante.

6. Objetivo General.

Viabilizar la producción de hidrógeno limpio a partir de sistemas integrados de energía eólica e hidrógeno mediante el desarrollo de una metodología para el dimensionado óptimo de los mismos.

7. Objetivos Específicos.

1. Desarrollar los modelos matemáticos necesarios para realizar el dimensionado de sistemas integrados de energía eólica e hidrógeno de acuerdo a condiciones específicas (potencial eólico del emplazamiento, demanda de electricidad, demanda de hidrogeno, etc.).

2. Evaluar los requerimientos del sistema, así como las características de los componentes del aerogenerador y del electrolizador, y sus posibles modificaciones, para posibilitar su operación conjunta.
3. Validar la metodología desarrollada mediante la evaluación de un sistema en condiciones reales de operación.

8. Meta.

Implementar una metodología para el dimensionado óptimo de sistemas integrados de energía eólica e hidrógeno.

9. Metodología.

El proyecto se ejecutará en las siguientes etapas principales:

Etapa Nro. 1: Estudio del estado del arte de todas las tecnologías involucradas en el proyecto.

Esta etapa se ejecutará durante el primer semestre del proyecto. Durante la misma se elaborarán cuatro documentos correspondientes al estado del arte de cada tecnología involucrada en el proyecto, es decir: electrolizador, almacenamiento de hidrógeno, celdas de combustibles e integración de energías renovables (eólica).

Se recopilarán y procesarán nuevos materiales con información científico-técnica relativa al tema (artículos científicos y técnicos, manuales y catálogos de los componentes disponibles en el mercado, etc.). Se realizará, además, una búsqueda de patentes relacionada con la temática objeto de investigación.

Etapa Nro.2: Estudio de las tendencias de los métodos de dimensionado de sistemas integrados de energía eólica e hidrógeno.

Durante esta etapa se realizará un estudio sobre las tendencias de los métodos de diseño de sistemas integrados de energía eólica e hidrógeno, lo cual permitirá caracterizar con una mejor precisión la situación problemática objeto de investigación. Esto permitirá conocer las principales deficiencias de los métodos actuales de dimensionado y los retos fundamentales planteados por instituciones científicas de reconocido prestigio.

Etapa Nro. 3: Desarrollo de un marco teórico para el sistema naturaleza-tecnología en el que se desempeñan los sistemas eólicos/hidrógeno.

Esta etapa estará dedicada a desarrollar una herramienta teórica que permita, con un enfoque sistémico, determinar las relaciones entre los ámbitos naturaleza-tecnología, en los que se deben desempeñar los sistemas eólicos para la producción de hidrógeno.

El objetivo fundamental de esta etapa es solventar los problemas ligados a los actuales enfoques puramente tecnológicos, que son utilizados en la implementación de sistemas energéticos.

Etapa Nro. 4: Desarrollo de la metodología para el dimensionado óptimo de sistemas integrados de energía eólica e hidrógeno.

Esta etapa será desarrollada siguiendo un enfoque sistémico-estructural, utilizando la Teoría General de Sistemas, la dinámica de sistemas, la modelación y la simulación de sistemas.

Etapa Nro.5: Validación experimental de la metodología desarrollada.

En esta etapa se desarrollarán experimentos con el objetivo de validar (ajustar) la metodología desarrollada en la etapa anterior. Los experimentos serán realizados en el laboratorio Solar-H₂-Celda de Combustible, en el laboratorio básico para la evaluación de componentes de sistemas h y en el laboratorio túnel de viento, todos del CIE y el IIE.

Serán utilizadas bases de datos de radiación solar y velocidad del viento con valores promedios horarios, y software profesionales para la simulación de sistemas híbridos con almacenamiento de hidrógeno, como el TRNSYS y el HOMER. La medición de variables será realizada siguiendo las recomendaciones prácticas y las normas establecidas internacionalmente.

Etapa Nro. 6: Escritura, revisión y presentación de la tesis doctoral.

Durante esta etapa se concluirá el proyecto doctoral con la escritura, revisión y presentación de la tesis doctoral.

10. Infraestructura Disponible.

- Laboratorio Solar-H₂-Celda de Combustible, CIE-UNAM.
- Laboratorios básicos para la evaluación de componentes del sistema híbrido.
- Información actualizada sobre sistemas eólicos, fotovoltaicos, híbridos y de producción de hidrógeno.
- Bases de datos de radiación solar y velocidad del viento con valores promedios horarios.
- Bases de datos de comportamiento de sistemas híbridos.
- Acceso a bases de datos de comportamiento de sistemas híbridos en otros países.
- Instalación demostrativa de un sistema integrado de energía eólica-hidrógeno-celdas de combustible, CIE-UNAM.
- Laboratorio Túnel de Viento, del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).
- Modernos sistemas de computo.

11. Diagrama de Gantt del Proyecto.

No.	Actividades	Semestres (S)					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	Estudio del estado del arte de todas las tecnologías involucradas en el proyecto. Realización de actividades docentes.						
2	Estudio de las tendencias de los métodos de dimensionado de sistemas integrados de energía eólica e hidrógeno. Desarrollo de un marco teórico para el sistema naturaleza-tecnología en el que se desempeñan los sistemas eólicos/hidrógeno.						
3	Desarrollo de la metodología para el dimensionado óptimo de sistemas integrados de energía eólica e hidrogeno.						
4	Presentación de examen de candidatura.						
5	Validación experimental de la metodología desarrollada.						
6	Escritura, revisión y presentación de la tesis doctoral.						

12. Comité Tutorial. Participación.

Etapas	Tutores				
	Dr. P. J. Sebastian	Dr. S.A. Gamboa	Dr. A. Sánchez	Dr. Joel Moreira	Dr. Oliver Prost
1	X		X	X	X
2	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X
4	X				
5	X		X	X	X
6	X	X	X	X	X

13. Bibliografía.

- [1] Curso-Taller Internacional Sobre Sistemas Híbridos. Honduras. 2004.
- [2] Jeremy Rifkin "Los albores de la economía del hidrógeno". Paidós, 2002. Presidente de la Fundación sobre Tendencias Económicas de Washington DC.
- [3] H. F. Mattio, M.A. Thauby. Manual del Curso Internacional Energía Eólica y Desarrollo Sustentable. Argentina. 2003.
- [4] J. J. Brey "El proyecto RES2H2 como demostración de la integración de fuentes de energía renovable con el vector hidrógeno". Marzo del 2003.
- [5] R. Glockner, C. Kloed, F. Nyhammer and O. Ulleberg "Wind-Hydrogen for Remotes Areas. A Norwegian Case Study". Agosto del 2004.
- [6] Omar G. S. Herramientas de análisis para simulación de sistemas híbridos. Instituto de Investigaciones Eléctricas. México. 2001.
- [7] O. Ulleberg "Stand Alone power system for the future: optimal design, operation and control of solar-hydrogen energy system. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1998.
- [8] Renewable Energy World. Review Issue. Vol. 6. No. 4. Julio-Agosto del 2003.
- [9] Kai Strunz "Stochastic Energy Source Access Management and Integration Through Hybrid Combination with Hydrogen". Hydrogen Production and Northwest Transportation Conference. Seattle, June 16, 2003 .
- [10] L.N. Grimsmo, M.Korpaas, T. Gjengedal "A Study of a Stand-Alone Wind and Hydrogen System". Nordic Wind Power Conference, 1-2 March 2004. Chalmers University of Technology.
- [11] R. Glockner, C. Kloed, F. Nyhammer and O. Ulleberg "Wind-Hydrogen for Remotes Areas. A Norwegian Case Study".
- [12] G. Adolfo "Wind Energy Storage by Means of Hydrogen". Department of Civil and Environmental Engineering. University College Cork. Ireland.
- [13] F. Barbier y T. Gómez. Int.J. Hydrogen Energy, Vol. 21, pp. 891-901, 1996
- [14] Riley, R.Q., "Alternative cars in the 21st Century", SAE, Warrendale, USA, 1994.
- [15] M. Kolhe, K. Agbossou, J. Hamelin and T. K. Bose "Analytical model for predicting the performance of photovoltaic array coupled with a wind turbine in a stand-alone renewable energy system based on hydrogen", Renewable Energy, Volume 28, Issue 5, April 2003, Pages 727-742 Abstract | Full Text + Links | PDF (164 K).
- [16] Øystein Ulleberg "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach, International Journal of Hydrogen Energy", Volume 28, Issue 1, January 2003, Pages 21-33 SummaryPlus | Full Text + Links | PDF (500 K).
- [17] R. R. Davda, J. W. Shabaker, G. W. Huber, R. D. Cortright and J. A. Dumesic "Aqueous-phase reforming of ethylene glycol on silica-supported metal catalysts, Applied Catalysis B: Environmental", In Press, Corrected Proof, Available online 31 December 2002, Abstract | Full Text + Links | PDF (339 K).
- [18] Jack K. Horner and Murray A. Wolinsky "A power-law sensitivity analysis of the hydrogen-producing metabolic pathway in Chlamydomonas reinhardtii, International Journal of Hydrogen Energy", Volume 27, Issues 11-12,

- November-December 2002, Pages 1251-1255 SummaryPlus | Full Text + Links | PDF (134 K).
- [19] Adnan Midilli, Murat Dogru, Galip Akay and Colin R. Howarth "Hydrogen production from sewage sludge via a fixed bed gasifier product gas", International Journal of Hydrogen Energy, Volume 27, Issue 10, October 2002, Pages 1035-1041 SummaryPlus | Full Text + Links | PDF (127 K).
 - [20] Robert Dautray "Les perspectives de l'énergie nucléaire dans le cadre des changements climatiques: The future of nuclear energy in relation with climate change", Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA -Earth and Planetary Science, Volume 333, Issue 12, 31 December 2001, Pages 811-826 Abstract | Full Text + Links | PDF (144 K).
 - [21] Anna Björklund, Marc Melaina and Gregory Keoleian "Hydrogen as a transportation fuel produced from thermal gasification of municipal solid waste": an examination of two integrated technologies, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 26, Issue 11, November 2001, Pages 1209-1221 SummaryPlus | Full Text + Links | PDF (221 K).
 - [22] Principios de Conversión de la Energía Eólica. Editorial CIEMAT, 1994.
 - [23] Cuadernos Estadísticos de las Energías Renovables en España, IDAE, MICYT, 1992.
 - [24] Tecnología de Materiales en la Conversión de las Energías Renovables, IER-CIEMAT, Madrid, 1993.
 - [25] Gourieres, D. Le. "Wind Power Plant. Theory and Design". Pergamon Press, 1982
 - Shefter Ya. I. "Wind Powered Machines". Leo Kanner Associates, Redwood City, California, 1974.
 - [26] Frandsen S., Trenka A. R. and Pederson B. M., "Recommended practices for Wind Turbine Testing. 1- Power Performance Testing", Edition 1982, IEA.
 - [27] Paul Gipe. "Wind Power for Home and Business". Chelson Green Publishing Company, Vermont, 1993.
 - [28] II Curso-Taller Internacional en Sistemas Híbridos Solar-Eólico para la generación de Electricidad. México. 2001.
 - [29] International Course on The Implementation of Wind Energy. The Netherlands. 2002.

Dr. Araon Sánchez Juárez
CIE-UNAM

Dr. Sergio A. Gamboa Sánchez
CIE-UNAM

Dr. Joel Moreira Acosta
UPCH

Dr. Oliver Probst
ITESM

Dr. Sebastián P. Joseph
CIE-UNAM