

# INTEGRACIÓN GENERADOR EÓLICO-ELECTROLIZADOR PARA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN SISTEMAS AUTÓNOMOS AISLADOS

**Griselda Jeandrevin<sup>a</sup>, Ramiro Rodriguez<sup>b</sup> y Ezequiel Leiva<sup>c</sup>**

<sup>a</sup> *Departamento de Mecánica Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Instituto Universitario Aeronáutico, Av. Fuerza Aérea km 6 ½, 5010 Córdoba, Argentina, gjeandrevin@iua.edu.ar, [www.iua.edu.ar](http://www.iua.edu.ar)*

<sup>b</sup> *Departamento de Matemática., Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5016 Córdoba, Argentina, ramiro246@gmail.com, [www.efn.uncor.edu](http://www.efn.uncor.edu)*

<sup>c</sup> *Departamento de Matemática y Física, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Haya de la Torre y Medina Allende, 5000 Córdoba, Argentina, eleiva@fcq.uncor.edu, [www.fcq.unc.edu.ar](http://www.fcq.unc.edu.ar)*

**Palabras Claves:** hidrógeno eólico, electrólisis, sistema eléctrico autónomo.

**Resumen.** En este trabajo se presentan el desarrollo de un prototipo autónomo de generación eléctrica, capaz de producir hidrógeno a partir de energía eólica. Este sistema consiste en un aerogenerador de eje horizontal de 2 kW de potencia, que entrega corriente alterna trifásica al equipo productor de hidrógeno (electrolizador). El electrolizador es de tipo alcalino y está adaptado a las características del aerogenerador a quien está conectado en forma directa. En esta primera etapa de evaluación del prototipo los gases producidos por el electrolizador son venteados a la atmósfera.

## 1 INTRODUCCIÓN

El agotamiento de las fuentes fósiles de energía, el aumento del costo de explotación y la contaminación ambiental que conlleva su uso, provoca un creciente interés en el desarrollo de energías limpias, de bajo costo y renovables; que le permitan al hombre mantener el consumo per cápita, hacer llegar los recursos energéticos a un mayor número de habitantes carecientes actualmente de ellos y mitigar el alto impacto sobre el medio ambiente que acarrea el uso de aquellos (Seth, 2000).

En la búsqueda de esas soluciones, se están llevando a cabo investigaciones, desarrollos y aplicaciones de fuentes de energías alternativas a los combustibles fósiles (Veziroglu, 2002).

Uno de estos combustibles alternativos, no primario, es el Hidrógeno, sustancia factible de almacenamiento, transporte, distribución y consumo. Actualmente se conducen acciones concretas a nivel internacional y nacional para el aprovechamiento de este combustible.

Una fuente prometedora para la producción de hidrógeno es la energía eólica, fuente renovable, inagotable y limpia.

La región patagónica constituye uno de los territorios con mayores recursos eólicos potenciales del mundo, según estimaciones del CREE, con un potencial de energía eléctrica a producir de alrededor de 500 mil MW. También existen muchos otros lugares con potenciales aceptables como el sur de la provincia de Córdoba, la zona este de San Luis, la costa de Buenos Aires, entre otros. Hasta el presente, la Argentina se ha presentado como consumidora productiva de la industria de aerogeneradores mundial y sólo existen antecedentes marginales en el uso de la energía eólica. Ver (Gonzalez, 2005).

En este contexto se desarrolla el proyecto “*Factibilidad Técnica, Económica y Ambiental de la Producción de Hidrógeno en la Provincia de Córdoba en Base a Recursos Eólicos Evaluada a Partir de Mediciones de Campo*” (PICTOR N° 936-5), seleccionado en la convocatoria 2004 PICTOR II realizada por la ex Agencia Córdoba Ciencia y cuyo Director es el Dr. Ezequiel Leiva. El proyecto se lleva a cabo actualmente por el Instituto Universitario Aeronáutico y la Universidad Nacional de Córdoba.

Para cumplir con objetivos específicos del proyecto mencionado se desarrolló la primera etapa de un prototipo autónomo de generación eléctrica, capaz de producir hidrógeno a partir de energía eólica.

Este sistema consiste en un aerogenerador de 2 kW de potencia que alimenta con corriente al equipo productor de hidrógeno. El generador eólico es de eje horizontal, tripala. Las palas se diseñaron para operar en zonas de vientos leves y se construyeron íntegramente de material compuesto. La energía eólica producida se transforma en corriente trifásica en un generador eléctrico que consta de imanes permanentes de neodimio, ubicados en el rotor.

El electrolizador de tipo alcalino está adaptado a las características del aerogenerador a quien está conectado en forma directa. La potencia de entrada al electrolizador está sincronizada a la potencia de salida del aerogenerador mediante una central. Su capacidad de producción es 0,8 Nm<sup>3</sup> Hidrógeno/ hora a una presión de operación máxima de 30 bar. Su operación es automática. Los gases generados, hidrógeno y oxígeno, tienen una pureza superior al 99 % y actualmente son venteados al ambiente.

En una segunda etapa se prevé tanto el almacenamiento de los gases producidos en tanques diseñados acordes a este concepto como la utilización reconversión del hidrógeno almacenado ya sea en satisfacción de carga térmica, o en electricidad mediante un motor de combustión interna y/o una celda de combustible.

En este trabajo se presenta el desarrollo de la primera etapa mencionada durante la cual se enfatizó el diseño y acoplamiento de las partes principales de este sistema de producción autónoma.

## 2 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EÓLICO

### 2.1 Nuevas Fuentes de Energía

El uso intensivo de los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural) desde el origen de la Revolución Industrial, en procesos tanto industriales como domésticos, ha mermado significativamente las reservas de estas fuentes de energías. Su renovación a través de procesos naturales considera tiempos de carácter geológico, por lo que a estas fuentes se las considera no renovables (Anglada, 1998).

Se debe considerar que el desarrollo económico e industrial del mundo está basado en el uso de energía. Prácticamente todos los aspectos de nuestra vida moderna extraen su energía de los combustibles fósiles, derivan materialmente de ellos, o reciben su influencia de algún otro modo. Es predecible que a medida que el país se desarrolla industrialmente y su población crece, el consumo de energía crecerá concomitantemente.

Según diversas fuentes (Energy, 2010) en este siglo los yacimientos de producción de fósiles petrolera se agotarán. Así, las reservas mundiales de estos combustibles se cifran en algunas décadas y paulatinamente el proceso de extracción comenzará a encarecerse con la consiguiente consecuencia económica mundial.

Adicionalmente, el uso de estas energías está íntimamente relacionado con procesos asociados al cambio climático global como son (Baird, 2002): la intensificación del efecto invernadero, la lluvia ácida y la pérdida de biodiversidad. Es por eso que estas energías tienen reputación de ser sucias para el medio ambiente. De hecho estos problemas no deberían ser menos acuciantes que la escasez del suministro.

Sin embargo, mientras que la era de los combustibles fósiles está entrando en sus últimos años, está naciendo un nuevo sistema energético que tiene el potencial de remodelar radicalmente la civilización (Rifkin, 2002).

### 2.2 Características del Nuevo Sistema Energético

Este nuevo sistema energético está basado en el Hidrógeno ( $H_2$ ). Este es el elemento más básico, abundante y distribuido en el Universo. Es el material de las estrellas y de nuestro Sol y, cuando se aproveche adecuadamente, será el “combustible eterno” (Rifkin, 2002). Es virtualmente inacabable y no produce emisiones nocivas de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) al quemarse; sus únicos subproductos son calor y agua pura, Tabla 1. Estamos en los albores de una nueva economía, la del  $H_2$ , que cambiará básicamente la naturaleza de nuestros mercados e instituciones sociales y políticas, como lo hicieron el carbón y la energía de vapor al comienzo de la Era Industrial.

Combustible	Composición elemental aproximada			Valor energético [kJ/gr]	Producto/s de combustión
	C	H	O		
Madera (Pino)	50	6	44	18	$CO_2$ , $H_2O$ , otros.
Hulla de antracita	82	1	2	31	$CO_2$ , $H_2O$ , otros.
Hulla bituminosa	77	5	7	32	$CO_2$ , $H_2O$ , otros.
Carbón	100	0	0	34	$CO_2$ , $H_2O$ , otros.
Petróleo crudo	85	12	0	45	$CO_2$ , $H_2O$ , otros.
Gasolina	85	15	0	48	$CO_2$ , $H_2O$ , otros.
Gas natural	70	23	0	49	$CO_2$ , $H_2O$ , otros.
Hidrógeno	0	100	0	142	$H_2O$

Tabla 1: Composición y el valor energético de algunos combustibles comunes (Brown, 2000).

En una comparación con distintos tipos de combustibles como se muestra en la Tabla 1, podemos ver que el Hidrógeno es el de mayor valor energético por unidad de masa y el único que en su combustión no produce gases de efecto invernadero.

### 2.3 Producción, Almacenamiento y Usos del Hidrógeno

El  $H_2$  se encuentra en todos los lugares del planeta, en el agua, en los combustibles fósiles y en todo organismo vivo. Debido a su gran reactividad química se encuentra siempre combinado formando compuestos, de modo que para obtenerlo puro, es necesario extraerlo. En la actualidad, casi la mitad del  $H_2$  que se produce en el mundo se obtiene del gas natural a través de un proceso de conversión con vapor. Aunque la utilización del vapor para convertir el gas natural ha demostrado ser la forma más barata de producir  $H_2$  comercial, el gas natural es un hidrocarburo y emite  $CO_2$  en el proceso de conversión. Además, es probable que la producción mundial de gas natural alcance su techo entre 2020 y 2030 y creará una segunda crisis de energía que le pisará los talones a la crisis del petróleo.

Sin embargo, existen otras formas de producir  $H_2$  sin utilizar combustibles fósiles en el proceso. Se podrían aprovechar fuentes renovables de energía -eólicas, fotovoltaicas, hídricas, geotérmicas, de biomasa- para producir electricidad. La electricidad, a su vez, se puede utilizar, mediante un proceso llamado electrólisis, para separar el  $H_2$  y el  $O_2$  del agua. El  $H_2$  puede luego almacenarse para emplearse posteriormente en una celda de combustible (CC); una celda electroquímica que sirve para generar electricidad para que produzca energía, luz y calor y ser utilizada cuando se necesite; o para alimentar un motor de combustión interna que produzca posteriormente energía eléctrica. El otro subproducto,  $O_2$ , tiene por otro lado usos en la medicina y otras actividades como la acuicultura. El esquema de producción de indica en la Figura 1.

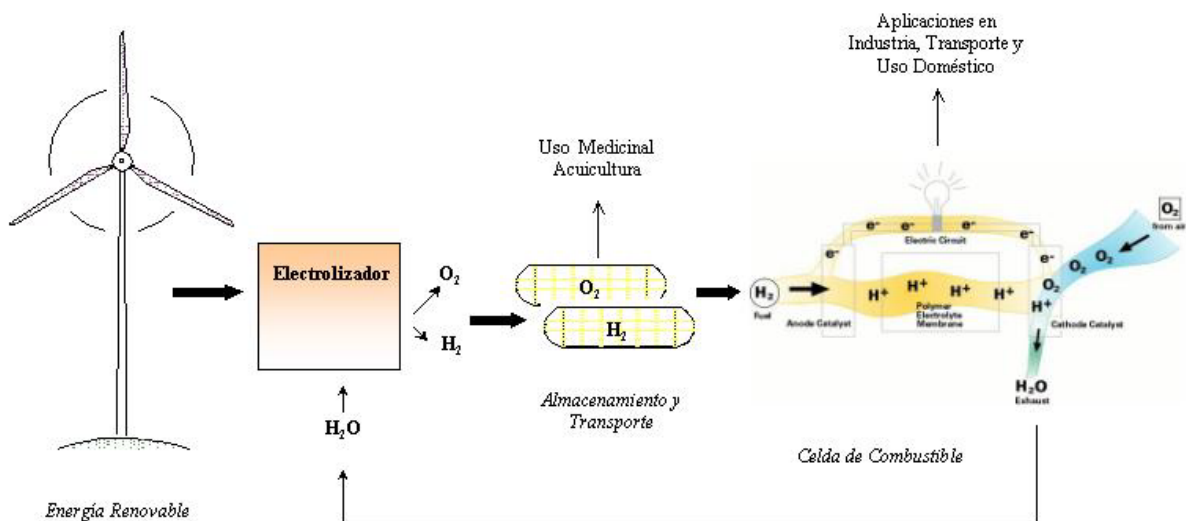


Figura 1: Producción de Hidrógeno a partir de energía alternativa limpia.

Nos podemos preguntar para qué producir electricidad dos veces, primero para conseguir electricidad para el proceso de electrólisis y luego otra vez para generar energía, calor y luz. La razón es que el almacenamiento de energía eléctrica (en realidad su conversión a energía química en acumuladores) es complicado y costoso. De modo que si el viento no sopla o el Sol no brilla, se dispone de la energía acumulada en el  $H_2$  y la actividad económica no se detiene. El  $H_2$  es una forma de almacenar fuentes renovables de energía para garantizar un

abastecimiento permanente y continuo de energía para la sociedad.

Además este sistema energético está basado en lo que llamamos Ciclo Cerrado de Recursos Energéticos: parte del consumo de agua y termina en agua como residuo final, como se muestra en la Figura 2.

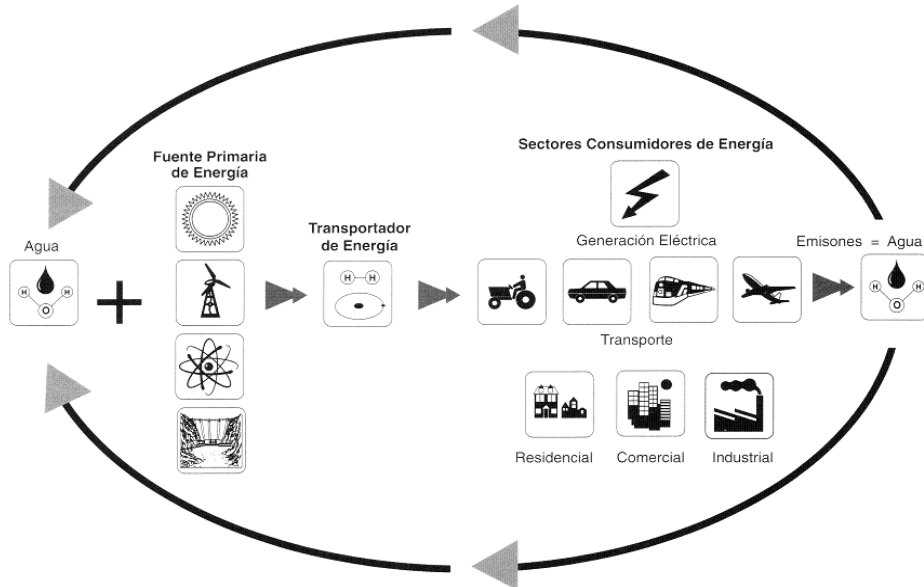


Figura 2: Ciclo Cerrado de Recursos Energéticos (Veziroglu, 2002).

## 2.4 Electrólisis

Hay 3 tipos principales de electrolizadores, los Alcalinos, los de Membrana de Intercambio de Protones (PEM) y los de Oxido Sólido. Los electrolizadores Alcalinos dominan la producción global y es el utilizado en este desarrollo.

La electrólisis alcalina es la tecnología más madura. Cuando una corriente eléctrica se aplica a un electrolito conductor acuoso, la molécula de agua se disocia en sus iones (moléculas diatómicas de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>). Debido a la corriente, los iones son atraídos a cada uno de los electrodos. La Figura 3 muestra un esquema de electrólisis alcalina, a la izquierda y uno con membrana de intercambio de protones, a la derecha.

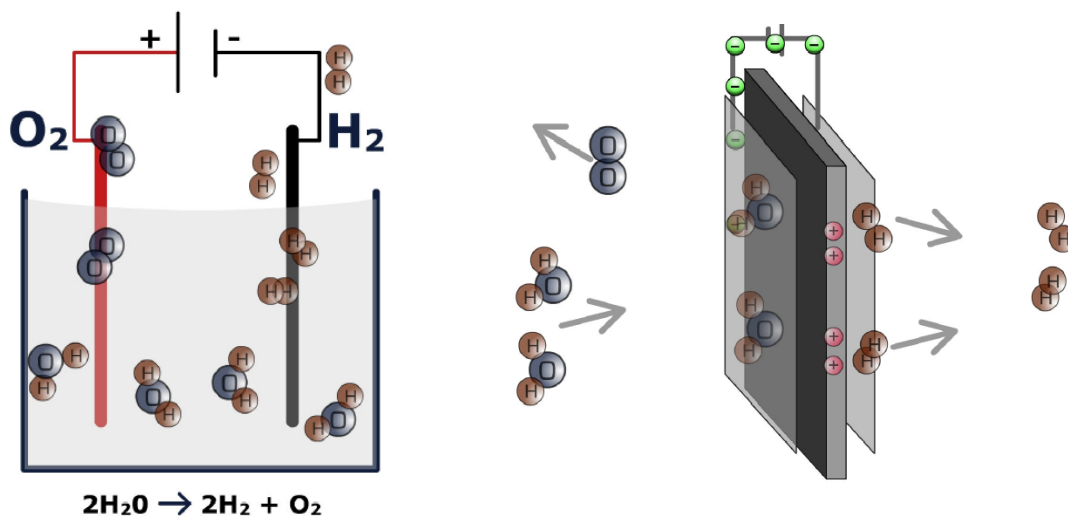


Figura 3: Electrólisis de agua. Alcalina (izquierda), con membrana de intercambio de protones (derecha).

### 3 GENERADOR EÓLICO

En el ámbito específico de la generación de energía, se diseñó y construyó un aerogenerador prototipo que se adapta específicamente a las exigencias del proyecto y a las condiciones de viento predominantes.

El aerogenerador fue instalado en el predio del Instituto Universitario Aeronáutico, ubicado donde las construcciones no son tan influyentes en las condiciones de operación (Coordenadas: 31° 25' 53" Latitud Sur y 64° 16' 38" Longitud Oeste).

La turbina fabricada es del tipo de eje horizontal de 3 palas, el diámetro del rotor es de 6.2 m, la altura al cubo (hub) es de 18 m y la potencia nominal de salida es de 2 kW.

A continuación se describen las principales tareas y la metodología usada para cumplir con este objetivo.

#### 3.1 Condiciones Externas

Con el objetivo de determinar cuales son las *condiciones de viento* en el lugar donde se instalaría el generador eólico prototipo se realizó el análisis de los datos meteorológicos de la zona. Este estudio se hizo sobre la base de las series históricas de velocidad y dirección de viento relevadas en la estación meteorológica de la Escuela de Aviación Militar durante 7 años. Los datos fueron suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional (identificación de la estación 87347).

La estación meteorológica Escuela de Aviación Militar AERO es una estación de superficie, la cual forma parte de la Red de Estaciones Climáticas en las que se realizan observaciones 3 veces por día con el fin de obtener registros que se ingresan a la base de datos existentes para el estudio del clima. En la estación mencionada las mediciones se toman a 10 m de altura.

Del total de datos analizados, se determinó que los meses de mayor intensidad de vientos son septiembre, octubre y noviembre con una velocidad promedio de 5.0 m/s, el resto de los meses del año la velocidad promedio es de 4.1 m/s. Esto puede observarse en la Figura 4.

Del total de datos adquiridos, fueron válidos el 99.4%, de los cuales el 10.95% corresponde a datos con velocidad del viento menor que 0.5 m/s, denominado porcentaje de calma.

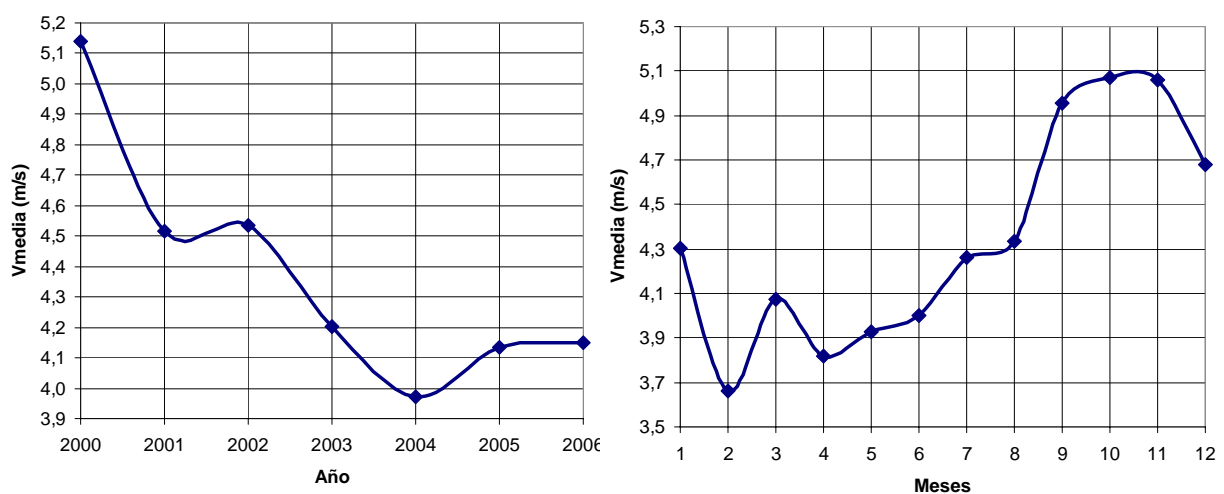


Figura 4: Velocidad de viento promedio anual y promedio mensual de la Estación Meteorológica de la Escuela de Aviación Militar de la Fuerza Aérea Argentina.

La dirección predominante de viento es del SW y N para las mayores intensidades de viento registradas, y del SSW para intensidades menores, pero de mayor frecuencia, como se muestra en la Figura 5.

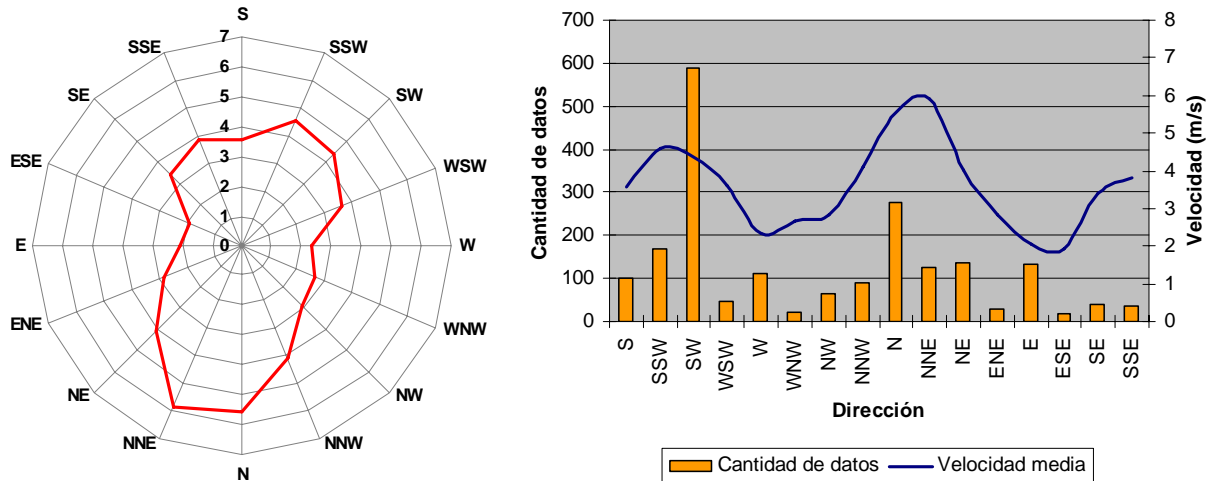


Figura 5: Rosa de los vientos y frecuencia de ocurrencia de cada dirección de viento.

Los aerogeneradores se encuentran “sumergidos” en la capa límite atmosférica en la SubCapa de la Estela. La distribución de la velocidad media en altura ajusta aproximadamente a una ley tipo potencial según:

$$\frac{V}{V_{ref}} = \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

Donde  $V$  es la velocidad media a la altura  $Z$ ,  $V_{ref}$  la velocidad media a la altura  $Z_{ref}$  y  $\alpha$  un parámetro empírico asociado a la rugosidad del suelo y que depende de la estabilidad de la atmósfera. Por ejemplo se utiliza 0.143 (1/7) para predecir el perfil de vientos en terrenos abiertos.

Considerando lo antedicho la velocidad promedio anual del viento para la altura del cubo del rotor (18m) es de 4.5 m/s y para la máxima velocidad promedio mensual que corresponde al mes de octubre es 5.4 m/s.

Como velocidad promedio de referencia o velocidad promedio de diseño para realizar los cálculos en el desarrollo del aerogenerador se consideró un valor de 6 m/s. Esta velocidad concuerda con la velocidad promedio para aerogeneradores Clase IV según la clasificación de clases de los Generadores Eólicos de Eje Horizontal dada por la norma IEC 61400-1 “Safety Requirements”.

### 3.2 Cargas

Las características del generador eólico estudiado está encuadrado en el marco de la regulación UNE-EN 61400-2 “Requisitos de Diseño para Aerogeneradores Pequeños” equivalente a IEC 61400-2 “Safety of Small Wind Turbines”. El objetivo de este estándar internacional es proveer al sistema de un adecuado nivel de protección contra posibles daños que pudieran ocurrir a lo largo de su vida útil. Adicionalmente, tiende a asegurar la calidad y la integridad estructural de los componentes y especifica requerimientos de seguridad para pequeños aerogeneradores incluyendo el proceso de diseño, la instalación, mantenimiento y operación de los mismos en condiciones específicas (EN 61400-2, 2007).

Dentro de las especificaciones de diseño, establece un número mínimo de casos de carga a considerar al momento de dimensionar las partes constituyentes del aerogenerador como las palas o la torre. Dichos casos se presentan en forma sintética en la Tabla 2.

El **caso A** prevé la potencial falla de los materiales por fatiga y se calcula para variaciones cíclicas de viento alrededor de  $V_R$  (rated wind speed) definida como la velocidad de viento a la que el aerogenerador entrega la potencia nominal. Para el aerogenerador estudiado,  $V_R = 6$  m/s.

El **caso B** indica calcular las fuerzas y momentos actuantes para la situación hipotética en la que, con velocidad de viento  $V_R$ , el rotor gire simultáneamente a la velocidad de yaw máxima posible.

El **caso C** prevé la eventual desconexión eléctrica de la carga exigiendo que el aumento de velocidad angular consecuente no ponga en riesgo la integridad estructural de las palas. Este análisis debe ser realizado a velocidad de viento  $V_{exr}$  (reference extreme wind velocity), que para este caso particular es  $V_{exr} = 35$  m/s.

Design situation	Load case	Wind inflow	Type of analysis	Remark	
Power production	<b>A</b>	Cyclic wind loading during normal operation	Cyclic varying wind speed around $V_R$	Fatigue	Power alternates cyclically between $1.5P_R$ and $9.5 P_R$ Rotor speed alternates cyclically between $1.5 n_R$ and $n_R$
	<b>B</b>	Yawing	$V_{hub} = V_R$	Ultimate loads	Maximum possible yaw speed
	<b>C</b>	Loss of electrical connection	$V_{hub} = V_{exr}$	Ultimate loads	Measure the rotor speed at normal wind speed and extrapolate to $V_{ext}$
Shut-down	<b>D</b>	Normal shut-down	$V_{hub} = V_R$	Ultimate loads	Braking torque
Parked	<b>E</b>	Minimum exposure	$V_{hub} = 1.4 V_{exr}$	Ultimate loads	Normal parking position
	<b>F</b>	Maximum exposure	$V_{hub} = V_{exr}$	Ultimate loads	Maximum attack area

Tabla 2: Casos de carga de diseño. Método simplificado de cálculo de cargas. Extraída de (EN 61400-2, 2007).

El **caso D** corresponde a la detención normal del rotor por acción del sistema de frenado; y los **casos E y F** a la situación: rotor detenido y expuesto a ráfagas, con mínima y máxima área expuesta, respectivamente.

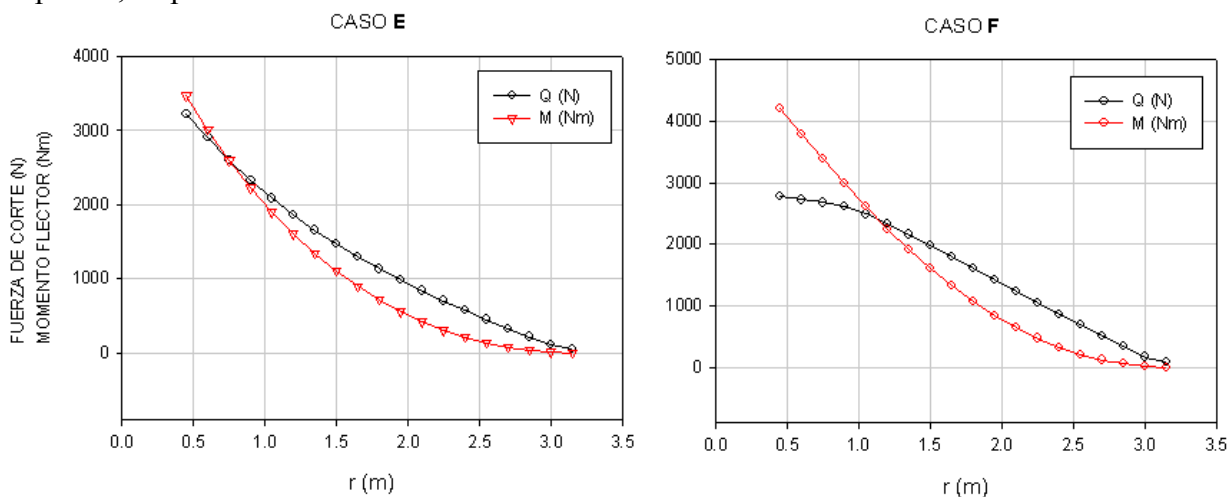


Figura 6: Distribución de fuerzas de corte y momentos flectores a lo largo de la pala.



Para cualesquiera de las situaciones planteadas, se debe garantizar la integridad de la estructura y, para ello, una de los procedimientos a seguir consiste en dimensionar a partir de la condición de carga más exigente y hacer una verificación posterior para el resto de los casos. Las palas, por ejemplo, se dimensionan a partir de los casos de carga **E** y **F**, y el resto de los casos se verifican. Los diagramas de fuerzas y momentos respectivos se presentan en la Figura 6.

La torre fue dimensionada considerando las cargas obtenidas con el método simplificado que propone la norma UNE-EN 61400-2 (EN 61400-2, 2007). Los valores de cargas obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Situación de Diseño	Caso de Carga		FX [N]	FY [N]	FZ [N]	MX [Nm]	MY [Nm]	MZ [Nm]
Power Production	<b>A</b>	Cyclic wind loading	536	0	-2500	159	763	0
	<b>B</b>	Yawing	0	0	-2500	0	4683	0
	<b>C</b>	Loss of Electrical Connection	0	0	-2500	0	189	0
Shut-Down	<b>D</b>	Normal shut-down	0	0	-2500	174	0	0
Parked	<b>E</b>	Minimum exposure	2476	0	-2500	0	743	0
	<b>F</b>	Maximum exposure	3675	0	-2500	0	1102	0

Tabla 3: Cargas sobre la torre, según un sistema de referencia asociado a la base superior de la torre.

### 3.3 Rotor

El Rotor está formado por las palas, el cubo y sus elementos de unión.

Cada pala tiene una longitud de 2950 mm y está diseñada con el mismo perfil aerodinámico S822 (Somers, 2005) en toda su longitud, desde la zona de puntera hasta el inicio a la zona de transición. La cuerda puntera tiene una dimensión de 200 mm y la cuerda máxima de 503.8 mm, ver Figura 7.

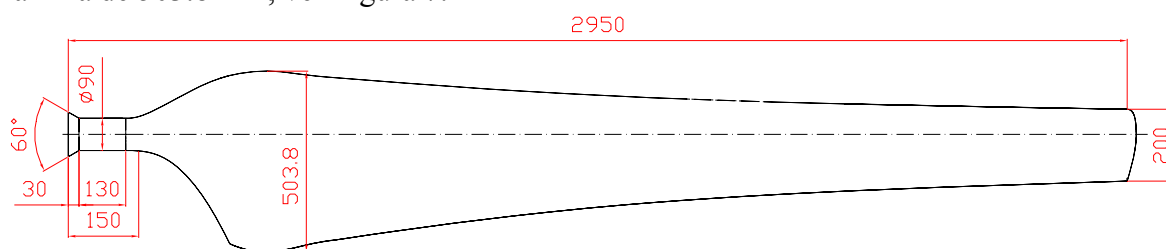


Figura 7: Vista en planta de la pala (dimensiones en mm).

La pala tiene alabeo geométrico (torsión), es decir que el ángulo de posición de los perfiles cambia a lo largo del radio. El ángulo máximo de torsión se encuentra en la zona raíz y es de 18.4° disminuyendo hacia la puntera en forma parabólica hasta -2.0°.

La fabricación consistió en primer lugar en estudiar la geometría teórica de la pala y sus dimensiones para diseñar el método de elaboración. Seguidamente, se fabricó el modelo patrón con la técnica elegida y finalmente se construyeron, a partir de este modelo, las matrices con las cuales se fabricaron las palas.

Las palas fueron confeccionadas de fibra de vidrio y resina viniléster en dos partes, las mismas son integradas a través de una toma rígida, un larguero de refuerzo y un labio de pegado en el borde de ataque. Atendiendo a la necesidad de definir una estructura eficiente, y previendo el incremento de las sollicitaciones hacia la zona de transición y toma, la estructura resistente de la pala, se divide en seis zonas según se indica en la Figura 8. Cada sector se

diferencia de los demás en la cantidad de capas y en el tipo de tela de vidrio utilizada. En todos los casos el laminado se construye haciendo una combinación de telas T220 orientadas a 0-90°, T220 a  $\pm 45$  y UR460 a 0°. La cantidad varía desde 4 capas de tela en la zona 1 hasta 19 capas en la zona 6.

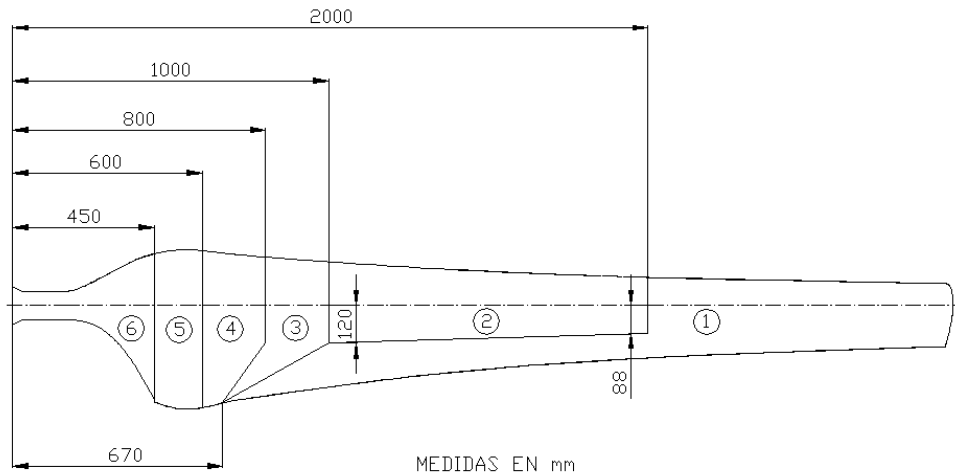


Figura 8. Definición de las zonas con diferente disposición de las fibras.

El cubo (hub) está formado por 2 discos de acero tratado y tres tomas o mordazas de Nylon 6. Los elementos de sujeción son 8 bulones de acero al carbono por cada una de las palas. La integración de los 3 elementos se muestra en la Figura 9.

Se seleccionó este diseño ya que permite el cambio de paso fijo de las palas y en un futuro implementar un sistema de paso variable.



Figura 9: Armado del Rotor, integración de palas al cubo.

### 3.4 Nacelle

En la nacelle o barquilla se encuentra principalmente el generador eléctrico, el sistema de freno y el sistema de control.

### 3.5 Torre y Fundación

La torre de un aerogenerador tiene la función de soportar el nacelle y el rotor, y proveer la

elevación necesaria para que las condiciones de viento no se vean modificadas por efectos del terreno.

La torre es un componente de baja tecnología pero de un costo significativo. En este caso, como el prototipo está fabricado pensando en futuras evoluciones, se diseñó la estructura portante con una plataforma de trabajo para permitir con rapidez las modificaciones necesarias, en la Figura 10 se presenta el detalle de lo descrito.

El mástil arriado consta de dos partes, un tramo exterior de sección cuadrada de 12 m de altura con un ancho de cara de 50 x 50 cm y un tramo interior de sección cuadrada de 7 m de altura con un ancho de cara de 30 x 30 cm. La parte interior se desliza haciendo que la torre tenga una longitud total de más de 18 m.

Se realizó la verificación de la estructura metálica del mástil soporte utilizando un software especialmente desarrollado para el cálculo este tipo de estructuras, que permite considerar la estructura como un sistema espacial, tomando en cuenta los efectos de segundo orden en el mástil, el comportamiento no lineal de las riendas y la influencia del pretensado.

Tratándose de un problema no lineal, la resolución se realiza por el método de iteración directa, reformulando en cada paso la matriz de rigidez de la estructura, hasta lograr la convergencia con la precisión deseada. Dado que el cálculo de la estructura se realiza a segundo orden, indirectamente se logra la verificación del pandeo global, quedando por considerar solamente el pandeo local del elemento que se analiza.

Para el cálculo del mástil y sus anclajes se emplearon las normas CIRSOC 101, 201, 301, 302 y 306. Se analizaron todas las direcciones de vientos normales a cara y diagonal y se consideró la máxima exposición del aerogenerador respecto de cada una de las direcciones de viento analizadas.

Las cargas que se verificaron fueron las obtenidas de los **casos B y F** mencionados anteriormente.



Figura 10: Torre arriotrada.

El suelo en el cual debe realizarse la fundación de la torre es de origen eólico, comúnmente denominado limo colapsable, por lo general son suelos macroporosos, de baja densidad y

tienen la particularidad de que con humedad natural normal pueden soportar cargas, pero si se saturan sufren grandes asentamientos o colapsos.

Del estudio del suelo se obtuvieron las características del mismo, que junto a las cargas determinadas para la torre, sirvieron para conseguir el volumen y la forma de la fundación para el mástil.

En la Figura 11 se presenta una imagen de la fundación realizada, la misma consta de un pilón central y de 4 anclajes, constituidos de una estructura de acero y hormigón.



Figura 11: Fundación.

### 3.6 Sistema Eléctrico

El generador eléctrico utilizado fue diseñado para esta aplicación. Es un generador de *imanes permanentes* con la ventaja que su accionamiento directo suprime la necesidad de un multiplicador de velocidad y se logra una simplificación notable del equipo; esto se traduce en un mantenimiento menos complejo y una disminución en la probabilidad de falla de los componentes.

Este generador entrega corriente alterna trifásica con un voltaje de 0 a 120 V según las revoluciones del rotor (dependientes de la velocidad del viento). La potencia máxima a entregar es de aproximadamente 5 kW a 180 rpm.

El diseño consta de un rotor de imanes permanentes de Imanes de neodimio, un estator con múltiples bobinados y la carcasa de aluminio.

En la Figura 12 se presentan los pasos iniciales del bobinado y el eje de acople entre el rotor aerodinámico el generador eléctrico.

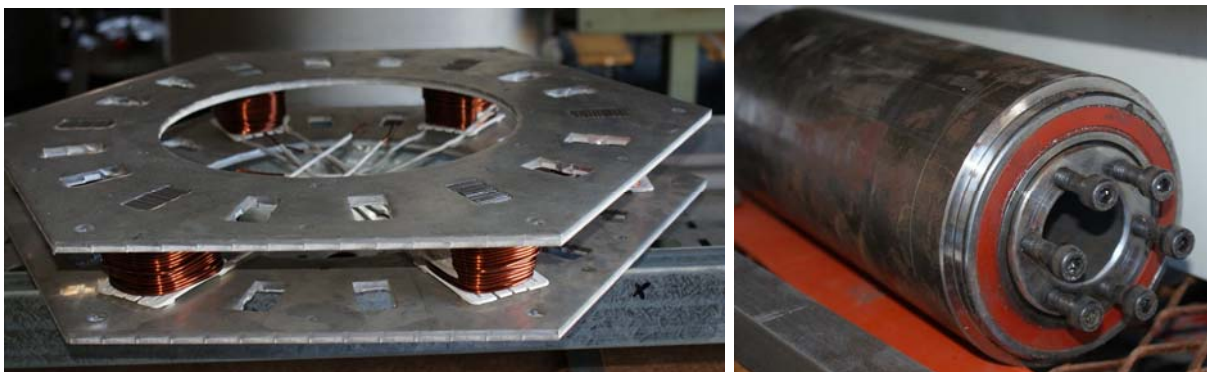


Figura 12: Partes del generador eléctrico.

En esta aplicación la corriente entregada al generador eléctrico es conectada directamente al dispositivo productor de H<sub>2</sub> a través de un cable subterráneo de 3 conductores.

### 3.7 Ensayos y Mediciones

Las mediciones en una turbina eólica se realizan para verificar la performance de potencia y las cargas de diseño. Los ensayos, a su vez, para verificar ciertos diseños (como el de la pala), el funcionamiento y la eficiencia de los sistemas de control y protección.

En este caso se realizó el ensayo estático en una pala del rotor, este ensayo consiste en realizar la flexión de la pala solicitada a una carga extrema con el objetivo de determinar su resistencia.

Según la Norma UNE-EN 61400-2, equivalente a IEC 61400-2 (EN 61400-2, 2006), la carga aplicada para el ensayo estático debe ser la peor combinación del momento flector en sentido del batimiento y la fuerza centrífuga. La pala debe ensayarse incluyendo el acoplamiento de la pala al buje.

Durante el ensayo no debe ocurrir ningún daño mientras se está realizando el proceso de carga. Este proceso finaliza cuando se llega a la carga máxima de operación, carga predicha mediante modelado e incluyendo el factor de seguridad indicado por la norma

Las cargas de ensayos fueron determinadas a partir de cálculos aerodinámicos utilizando el método de paneles estacionarios. La Figura 13 muestra la deflexión de la pala en una de las etapas del Ensayo Estático de Flexión.



Figura 13: Deflexión de la pala en las distintas etapas del Ensayo Estático de Flexión.

## 4 ELECTROLIZADOR

La electrólisis del agua empezó a desarrollarse en la primera revolución industrial, en el año 1800, cuando Nicholson y Carlisle descubrieron la descomposición electrolítica del agua. En 1902 existían más de 400 unidades electrolíticas operativas y hasta la actualidad se aplicaron diversos diseños. Actualmente se trabaja en la optimización de los electrolizadores alcalinos para disminuir el consumo específico de corriente, en la prolongación de la vida útil de las membranas de intercambio de protones, tanto en electrolizadores como en pilas de combustibles y en la electrólisis a alta temperatura mediante el uso de la tecnología de óxidos

sólidos.

El reactor electrolítico es un desarrollo totalmente original realizado por el Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA). Es un equipo prototipo ya que es el resultado del trabajo de investigación y experimentación, ver Figura 14. El dispositivo diseñado y fabricado para el proyecto es del tipo alcalino autopresurizado.

Las características técnicas generales son:

Alimentación de potencia: **Trifásica, entre 40 V y 120 V**

Alimentación de control: **Monofásica, 220 V, 50 Hz**

Consumo máximo: **5 KW**

Caudal máximo: **0,8 m<sup>3</sup> NH<sub>2</sub>/h**

Presión máxima de operación: **30 bar**

Presión máxima de almacenamiento: **25 bar**

Temperatura de operación: **60 °C**

Electrolito: **KOH 30 %**

Agua de reposición: **Desmineralizada (Conductividad < 10 μS)**

Temperatura ambiente de operación: **de -5 °C a 30 °C**



Figura 14: Electrolizador.

#### 4.1 Partes Principales del Electrolizador

Un electrolizador alcalino es un dispositivo en el que se produce la electrólisis del agua en el seno de un medio alcalino. En el electrolizador se produce la reacción no espontánea con una variación de energía libre  $\Delta G$  (1 bar, 298 K) = 237 kJ/mol, necesaria para separar el agua en hidrógeno y oxígeno al hacer circular una corriente continua de una manera conveniente en una celda electrolítica. Los requerimientos para que ocurra esta reacción son: 0.8 L de agua + 2393 Ah  $\implies$  1 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>.

Un electrolizador consta de varias celdas electrolíticas conectadas eléctricamente entre sí.

Los procesos electroquímicos demandan requisitos particularmente altos en cuanto a protección contra la corrosión. La electrólisis de agua con hidróxido de potasio como electrolito se lleva a cabo usando acero al carbono como material de construcción y las áreas especialmente sujetas a ataque están niqueladas.

En los siguientes apartados se detallan las partes más importantes de las celdas electrolíticas.

### **Electrodos**

Se emplean para conducir de manera conveniente la corriente eléctrica en el seno del electrolito de modo que se produzca correctamente el proceso de electrólisis (proceso de óxido-reducción). En el electrodo positivo (ánodo) y en su interfase de separación con el electrolito se produce la semireacción de formación de oxígeno gaseoso (proceso de oxidación). En el electrodo negativo (cátodo) y en su interfase de separación con el electrolito se produce la semireacción de formación del hidrógeno gaseoso (proceso de reducción).

Los electrodos deben ser resistentes a la corrosión, tener buena conductividad y buenas propiedades catalíticas, poseer integridad estructural.

### **Electrolito**

Aporta los iones encargados de la conducción en el interior de la celda electrolítica. En este caso al tratarse de una electrólisis que emplea una solución de KOH en agua, el electrolito también aporta el reactivo de la reacción (grupos oxidrilos OH<sup>-</sup>).

### **Diafragma**

Separa el compartimento anódico del catódico permitiendo sólo el paso de los iones que transmiten la carga del cátodo al ánodo (OH<sup>-</sup>).

## **4.2 Sistemas Complementarios del Electrolizador**

### **Sistema de Refrigeración**

El equipo posee un sistema de refrigeración que utiliza como líquido refrigerante una mezcla de agua desmineralizada y fluido anticongelante y anticorrosivo, del tipo empleado en automóviles.

### **Sistema de Recirculación**

El equipo dispone de dos bombas de recirculación de electrolito que funcionan permanentemente, mientras esté activado el sistema de potencia.

### **Línea de Salida de Gases**

Cada línea de salida de gases posee entre otros dispositivos, una electroválvula de posición normal cerrada, alimentada con 220 V, la cual tiene como función interrumpir la salida de gases en caso de corte accidental de energía. También existe una válvula dosificadora de salida, la cual limita la salida de gases para que el flujo sea moderado y se facilite su control.

## **4.3 Principios de Funcionamiento Básico**

Un electrolizador alcalino emplea una solución alcalina, normalmente KOH, como electrolito.

En la configuración monopolar cada electrodo tiene la misma polaridad en ambas superficies y realiza un solo proceso electroquímico; desprendimiento de  $H_2$  en el cátodo y de  $O_2$  en el ánodo. En la configuración bipolar cada electrodo funciona como cátodo en una cara y como ánodo en la otra. Es decir dos procesos electroquímicos simultáneos.

La Figura 15 muestra la configuración básica de una celda electroquímica alcalina. Así, ánodo y cátodo se encuentran separados por un diafragma polimérico, el cual permite fluir a la corriente pero es impermeable a los gases. La celda está llena de un electrolito. Durante la electrólisis, se forma oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo, teniendo lugar las siguientes reacciones:

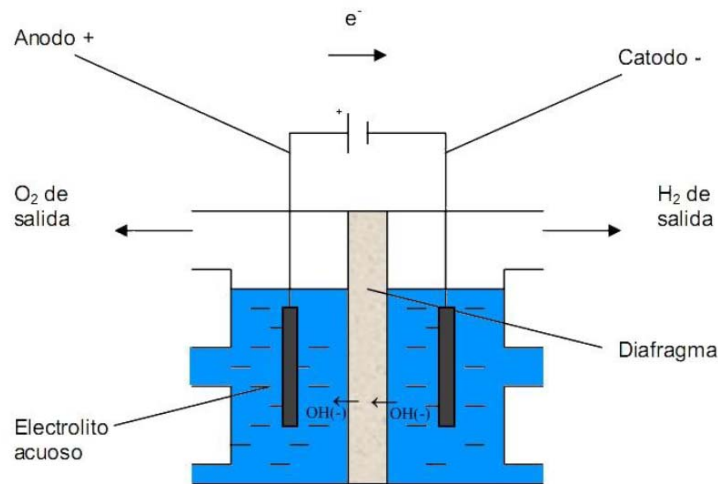
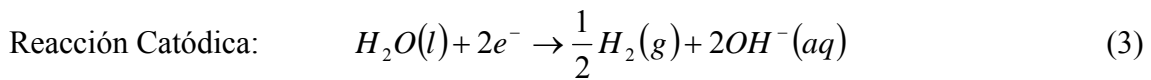
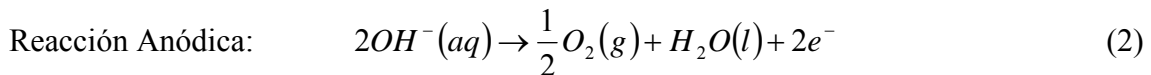


Figura 15: Esquema de funcionamiento de un electrolizador alcalino.

Los iones oxidrilo ( $OH^-$ ) y potasio ( $K^+$ ) disueltos en agua atraviesan el diafragma portando la carga eléctrica, cuando un ión oxidrilo llega al ánodo se separa en agua líquida y oxígeno gaseoso liberando un electrón que es recogido por el ánodo debido a la diferencia de potencial inducida por la fuente de tensión continua colocada entre los electrodos. Los electrones, cuando llegan al cátodo se combinan con las moléculas de agua líquida separándolas en hidrógeno gaseoso e iones oxidrilo que se ven obligados a migrar otra vez hacia el ánodo por la acción del campo eléctrico.

#### 4.4 Principios de Funcionamiento Operativo

##### Operación

El reactor electroquímico posee cuatro estados automáticos de funcionamiento: Interrupción, Presurización, Suministro y Despresurización.

Durante el proceso de **Presurización** el equipo presuriza el sistema hasta alcanzar la presión de trabajo seleccionada, los gases producidos son venteados.

Durante el proceso de **Suministro** el equipo inicia el suministro de los gases enviándolos al depósito y/o los venta



Durante el proceso de **Despresurización** el equipo realiza el venteo gradual de los gases. La despresurización debe realizarse siempre que el equipo vaya a quedar inactivo durante un tiempo prolongado (varios días o más) o cuando se deba realizar alguna operación de mantenimiento.

Durante el proceso de **Interrupción** equipo desconecta la alimentación del electrolizador y conecta el aerogenerador a la carga fantasma

### Monitoreo de Variables

El equipo se conecta a una computadora para acceder a la visualización de los parámetros principales de funcionamiento, estos parámetros consignados en la pantalla cambiarán para indicar los valores medidos en tiempo real.

En la Figura 16, se observa la pantalla principal del programa de visualización, en la cual, se reproduce simbólicamente los componentes de las líneas de salida de ambos gases, así como un esquema del tanque principal del electrolizador. Además, las posiciones (abierta o cerrada) de las válvulas de salida o alivio y la servo-válvula.

En cada una de las líneas de salida de gases, se indica las respectivas presiones de los tanques a los que esté conectado el equipo.

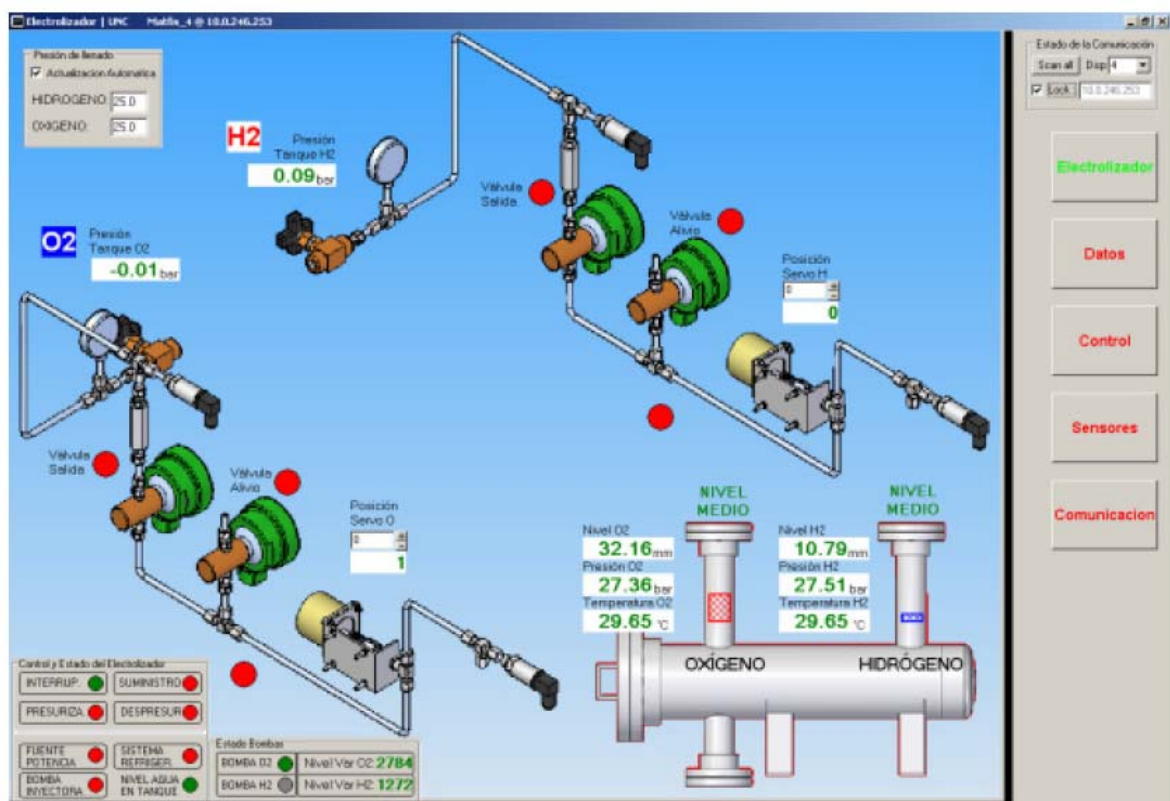


Figura 16: Esquema de funcionamiento de un electrolizador alcalino.

### Almacenado de Datos

Se puede realizar el almacenamiento de la información de los parámetros de funcionamiento del equipo, a intervalos de tiempos deseables.

Los datos que pueden visualizarse son:

## Niveles de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>

- Temperatura de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>
- Presión G de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>
- Presión T de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>
- Posición de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>
- Est. V. de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>
- Corriente CC

En la Figura 17 se puede visualizar un gráfico histórico de variables registradas por el equipo.

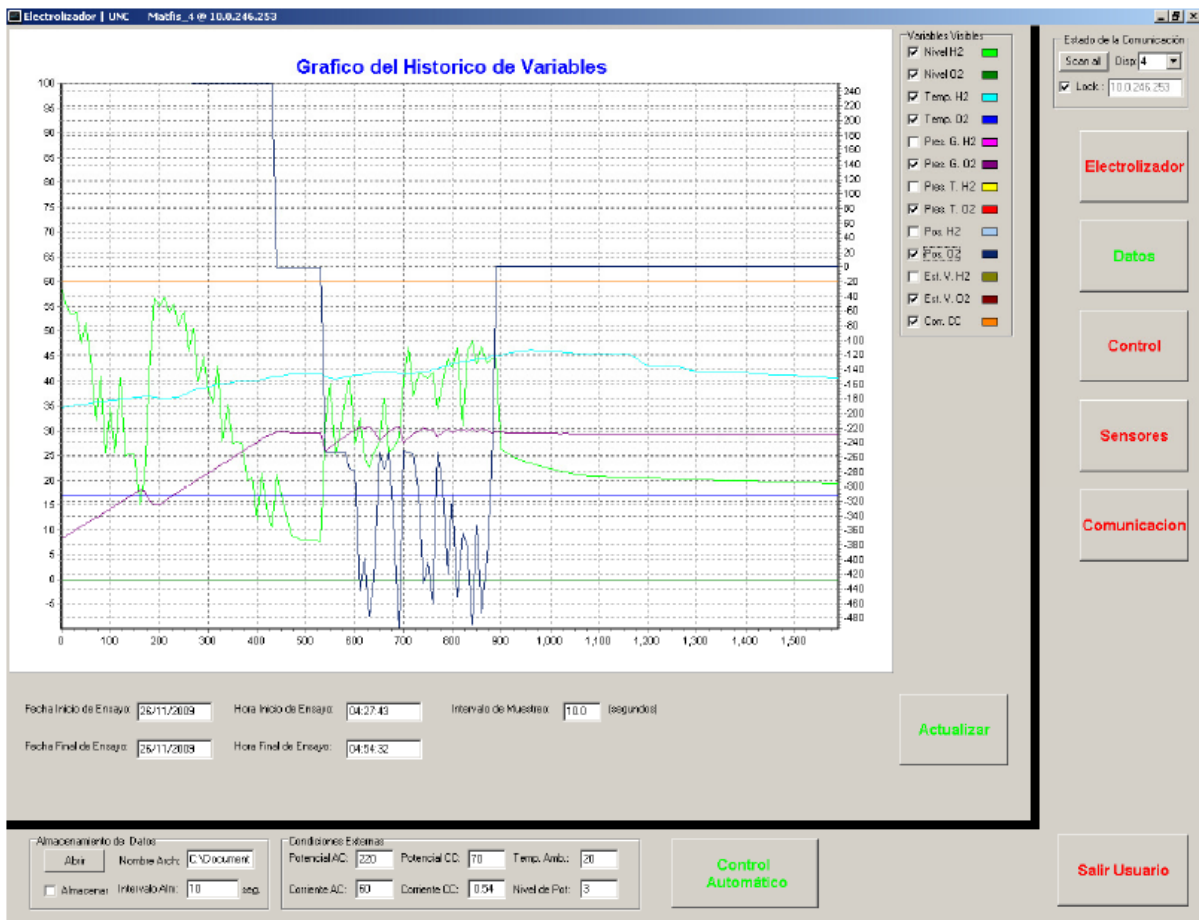


Figura 17: Grafico de variables.

## 5 INTEGRACIÓN GENERADOR EÓLICO-ELECTROLIZADOR

En lo concerniente a la integración del generador eólico al electrolizador, este último equipo dispone de un sistema de gestión de potencia que permite la conexión directa del aerogenerador al electrolizador. Las tres fases provenientes del aerogenerador se conectan a una bornera del tablero de gestión de potencia. El sistema de gestión de potencia administra la energía suministrada por el aerogenerador, derivando la corriente alterna trifásica proveniente del mismo, hacia una carga fantasma o rectificándola y enviándola al electrolizador, según corresponda. En el segundo caso, mediante el control del número de diodos activos en el rectificador, el sistema mantiene la corriente suministrada al electrolizador en el valor más

alto posible, dentro de un intervalo prefijado. De esta manera se puede aprovechar un rango más amplio de velocidades del viento.

Posteriormente se realizará un análisis de las consecuencias de la integración del generador eólico al electrolizador con el sistema de control actual. Esto implicará el desarrollo de un dispositivo electrónico que permitirá realizar la colecta de datos remotamente.

## 6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En lo referente a las partes desarrolladas del generador eólico han sido concluidas con éxito. Tanto las palas, la torre y el sistema eléctrico han cumplido con lo previsto en el diseño preliminar.

Los parámetros involucrados en la optimización de una celda de electrólisis se refieren a dos aspectos principales:

- La adecuada comprensión de fenómenos Físico-Químicos tales como: conducción iónica en polímeros, estabilidad de materiales y cinética electroquímica (Ciencia Básica).
- El dimensionamiento y la disposición adecuada de todos los elementos que conforman la celda, determinados por fenómenos como: transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento en la celda (Ingeniería Química).

En cada uno de estos aspectos es necesario realizar investigaciones que propendan a optimizar la cadena de gestión de la energía.

Una vez alcanzados estos objetivos, se planea a futuro disponer de un sistema autónomo de energía, que sea modular, transportable y capaz de entrar en servicio en forma prácticamente inmediata. Este equipo podrá ser utilizado en estaciones remotas repetidoras de: telefonía celular, televisión, radio VHF-UHF, internet y/o transmisión de datos.

También para comunidades carentes del recurso energético como: escuelas rurales, centros asistenciales rurales (dispensarios), comunidades indígenas o pequeñas poblaciones alejadas de la línea de distribución eléctrica.

Este proyecto será muy eficiente para el caso de catástrofes naturales, siendo una alternativa rápida y segura para abastecer de energía a hospitales de campaña, centros de comunicaciones y comunidades aisladas por el fenómeno.

Para lograr este objetivo se desarrollará **un equipo híbrido (eólico-solar-combustible fósil-hidrógeno) para la generación de energía, que se dispondrá** en un gabinete -tipo shelter o contenedor marítimo- apto para funcionar en climas extremos. De esta manera se pretende considerar la utilización de energías renovables con un enfoque integral, aplicable a zonas aisladas.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el soporte financiero de la ex Agencia Córdoba Ciencia (actualmente Ministerio de Ciencia y Técnica de la Provincia de Córdoba) y al programa BID 1728/OC-AR a través del Proyecto PICTOR 936.

A los alumnos del IUA que fabricaron el modelo, las matrices, las palas y los montajes del ensayo de flexión.

Participaron y colaboraron en el ensayo muchas personas, alumnos del Instituto Universitario Aeronáutico, investigadores del Centro de Investigaciones Aplicadas, personal del Laboratorio de Estructuras, entre otros. Agradecemos la colaboración de la Ing. Patricia

Irico y el personal del laboratorio.

Al Ingeniero Lucas Ruffini por su ayuda en distintas etapas. Al Ingeniero Hans Smith y al Ingeniero Teodoro Altinger. Y a la cantidad de personas que nos brindaron su apoyo.

Finalmente a las Empresas Generadora Córdoba S.A. y Gamma S.A. por su ayuda financiera y logística.

## REFERENCIAS

Anglada Manuel Ludevid, *El Cambio Global en el Medio Ambiente*, Editorial Alfa Omega, 1998.

Baird Colin, *Química Ambiental*, Editorial Reverté, 2002.

Brown, LeMay, Bursten, *Química, La Ciencia Central*, 7ma Edición, Pearson, Prentice Hall, 2001.

Burton T., Sharpe D., Jenkins N. y Bossanyi E., *Wind Energy Handbook*, Wiley, 2001.

DNV and Riso, *Guidelines for Design of Wind Turbine*, Second Edition, 2002, Jydske Centraltrykkeri, Denmark, 2002.

Energy Files: <http://www.osti.gov/energyfiles/resource.shtml>.

Gonzalez J. A., *Importancia de la energía eólica en el desarrollo*, Portal Energetico Internacional, <http://www.gabinete.org.ar/Octubre2005/renovable.htm>, 2005.

IEC 61400-23, IEC (Commission Electrotechnique Internationale), *Wind Turbine Generator Systems Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades*, Technical Specification IEC TS 61400-23, first edition, 2001-04.

Manwell J.F., McGowan J. y Rogers A., *Wind Energy Explained, Theory, Design and Application*, Wiley, 2002.

Rifkin Jeremy, *La Economía del Hidrógeno. La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la Tierra*. Barcelona, Editorial Piados, 2002.

Sánchez C. and Leiva E.P.M., *Handbook of Fuel Cells. Fundamentals, Technology and Applications*, Vol. 2 (Electrocatalysis), eds. W. Vielstich, A. Lamm and H. Gasteiger, ISBN: 0-471-49926-9, Editorial Wiley & Sons Ltd, 2003.

Seth Dunn, *World Watch*, November/December 2000 Worldwatch Institute, pp14, 2000.

Somers D.M., *The S822 and S823 Airfoils*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), EEUU, 2005.

UNE-EN 61400-2: Aerogeneradores Parte 2: *Requisitos de diseño para aerogeneradores pequeños*, equivalente a IEC 61400-2:2006, Octubre 2007.

Veziroglu T. N., *Miscelánea N°99 de la Academia Nacional de Ciencias*, Córdoba, Argentina, 2002.