

ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, A PARTIR DE RECURSOS EÓLICOS

Rodríguez C.R.⁽¹⁾, Wuthrich N.⁽¹⁾, Cobos J.⁽¹⁾, Santa Cruz R.⁽¹⁾, Aisa S.⁽¹⁾, Jeandrevin G.⁽²⁾, Leiva E.P.M.⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidad Empresarial Siglo 21, Monseñor Pablo Cabrera s/n calle, 5000, Córdoba, Argentina, rrodriguez@uesiglo21.edu.ar, noelia_w55@hotmail.com, MACU7@hotmail.com, rsantacruz@uesiglo21.edu.ar, saisa@uesiglo21.edu.ar

⁽²⁾ Instituto Universitario Aeronáutico, Avenida Fuerza Aérea km 8 ½, Córdoba, Argentina, gjeandrevin@yahoo.com.

⁽³⁾ INFIQC, Departamento de Matemática y Física, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba Argentina, eleiva@fcq.unc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta la Evaluación Económica y Ambiental del proyecto de instalación de un parque eólico en la provincia de Córdoba con fines de producción de hidrógeno. El potencial de hidrógeno eólico se analiza para cada departamento de la provincia, considerando los requerimientos energéticos del electrolizador y el factor de capacidad de los sitios analizados. Se analizaron cuatro aspectos del sistema: la evaluación del recurso eólico, el análisis del costo de producción de hidrógeno vía electrólisis, los requerimientos de energía eólica anual para producir hidrógeno y la evaluación de impacto ambiental del proyecto. Para ello se modela una planta que genera una potencia nominal de 60 MW. A partir del costo modelado de producción de la energía, se determina el de producción de hidrógeno. El presente análisis contribuirá a definir los desafíos y oportunidades para la producción de hidrógeno/eólico, que definirán una futura economía del hidrógeno.

Palabras clave: Economía del hidrógeno. Producción hidrógeno/eólica. Medioambiente.

INTRODUCCIÓN

La energía eólica se puede aprovechar para proveer electricidad limpia a electrolizadores y producir hidrógeno (Menzl, et al, 1998. Spinadel, 2004). De este modo, dicha producción puede proveer una vía para el uso de fuentes domésticas de energía renovables que contribuyan directamente a la reducción de gases de efecto invernadero y al reemplazo del uso de combustibles fósiles. El hidrógeno de alta pureza se produce vía electrólisis mediante el paso de electricidad a través de dos electrodos en una solución acuosa o membrana. La molécula de agua se divide para producir gas oxígeno en el ánodo y gas hidrógeno en el cátodo, mediante la siguiente reacción: $H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2$ (Chialvo, 2004).

Esta vía de generación de hidrógeno es la que presenta el costo más bajo entre las que emplean recursos renovables y genera menos externalidades¹. *El empleo de hidrógeno facilitaría la transferencia a gran escala de energía, desde áreas de bajo costo eolo-eléctrico y otros métodos libres de CO₂ para la generación de electricidad* (Renewable Energies, 2006).

Por otra parte, La preocupación por el medioambiente es una de las cuestiones de mayor trascendencia para el futuro de los seres vivos en la Tierra. No sólo se debe poner remedio a los efectos negativos producidos por la actividad humana sino evitar o, al menos, disminuir progresivamente las causas. Con este objetivo surgió en 1987 el *concepto de "sustentabilidad" referido al desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas*. Así, el concepto involucra aspectos ecológicos, económicos y sociales, que deben considerarse colectivamente y con sus interacciones (Anglada, 1998).

En base a lo precedentemente expuesto, para determinar la factibilidad económica y ambiental de la producción de hidrógeno/eólico es deseable analizar cuatro aspectos del sistema:

1. Evaluación del recurso eólico. **2.** Evaluación del impacto ambiental del proyecto. **3.** Análisis del costo de producción del hidrógeno vía electrólisis de agua. **4.** Los requerimientos de energía anual para la producción de hidrógeno.

METODOLOGÍA

1. Evaluación del recurso eólico

El Centro Regional de Energía Eólica (CREE) en conjunto con la Subsecretaría de Infraestructuras y Programas, Ministerio de Obras y Servicios Públicos del Gobierno de la Provincia de Córdoba trabajaron en el diseño de un mapa eólico, cuya información será empleada para esta estimación. Tal mapa provee información sobre la potencia eólica disponible en los diferentes lugares del

¹ El daño causado por el uso y la conversión de energía puede, en ciertas circunstancias, conducir a costos considerables. Debido a que estos costos no están reflejados en el mercado de precios para la electricidad y el calor, son llamados *costos externos*, los que conducen a una asignación económica inadecuada de los recursos no renovables. La solución a este problema es simple en teoría: los costos externos deben "internalizarse". Es decir, los costos atribuidos al daño en el medio ambiente deben asignarse a sus causas; de modo que los valores de mercado contemplen todos los costos relevantes asociados con la producción o el servicio energético.

país. Como se indicara en la introducción, la energía que puede obtenerse anualmente en una dada ubicación, E_{anual} , se puede calcular a partir de (Crespo et al, 2003):

$$E_{anual} = N_0 \int_{u=V_i}^{u=V} P(u) f(u) du \quad (1)$$

Donde N_0 es el número de horas en un año (8765), $P(u)$ es la función de potencia del generador eólico utilizado y $f(u)$ es la función de distribución de velocidades de viento, que puede aproximarse usando la distribución de Weibull. La integración se realiza entre los límites de velocidad del viento en el que la turbina eólica se encuentra operativa. A los fines del cálculo, las presentes estimaciones se realizaron considerando factores de ocupación de la turbina V-90 de 2 MW y 95 m de altura del eje, de la fábrica Vestas, con una potencia nominal instalada de 5 MW/km². Con este generador, se observó cuanta energía anual, E_{anual}^i , se produce. Se calcularon las áreas equipotenciales (A_i) dentro de cada departamento y se multiplicaron por la energía calculada anteriormente, suponiendo una densidad de 2,50 turbinas por kilómetro cuadrado. De este modo, cada región equipotencial del departamento, genera una cantidad de energía $E(A_i)$ igual a:

$$E(A_i) = E_{anual}^i A_i \times 2,50 \quad (2)$$

Así, la energía anual generada en un dado departamento será:

$$E_{depto} = \sum_i E(A_i) \quad (3)$$

Donde el índice de la sumatoria corre sobre todos los tipos de área equipotencial de un dado departamento.

Para el cálculo de las áreas, se descontaron las reservas naturales y las zonas con pendientes mayores a 20% que no son adecuadas para la instalación de generadores eólicos. A pesar de esto, los valores de las áreas consideradas en el cálculo son indicativas, y por diversas razones sólo en una fracción de ellas es factible la instalación de parques eólicos.

2. Metodología del estudio de impacto ambiental

2.1 Objetivos de la EIA. Marco Legal. Se consideraron las siguientes reglamentaciones: Decreto N° 2131 - Reglamentario del Cap. IX "Del Impacto Ambiental" de la Ley 7343 de la provincia de Córdoba. Ley 7343: Principios rectores para la preservación, conservación, defensa y mejoramiento del ambiente. Ley Nacional 26.190: Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica. Ley nacional N° 25019: régimen nacional de energía eólica y solar. Protocolo de Kyoto, Art. 12 sobre Mecanismo de Desarrollo Limpio (Argentina ratificó el Protocolo de Kyoto por la Ley N° 25.438).

En este proyecto se plantea la producción de hidrógeno limpio, a partir de energía eólica, con posterior almacenamiento del gas. Así, se tiene por objetivo evaluar la idoneidad del hidrógeno como medio de almacenaje de energía en forma gaseosa, mediante el aprovechamiento de la producción de electricidad del parque. Para la instalación de los equipos es necesaria la ejecución de obras con el fin de acondicionar el área de ubicación y el acceso a la misma. Tales obras consistirán en la formación de una explanada, el acceso a la misma para el transporte de los equipos y el mantenimiento de los mismos, las correspondientes zanjas para albergue de los conductos de la red de agua y la red de energía eléctrica, la red de saneamiento para la evacuación de las aguas superficiales, así como la ejecución de las fundaciones de hormigón armado para cada torre, el vallado perimetral de la zona objeto de la presente actuación.

Teniendo en cuenta la normativa existente y las referencias que se señalan, se fijaron los siguientes objetivos para la presente Evaluación de Impacto Ambiental (Gómez Orea, 2002):

1. Definir y describir los parámetros básicos del Proyecto desde un punto de vista ambiental. **2.** Definir y valorar el estado pre-operacional del entorno del Proyecto. **3.** Identificar y evaluar de forma cualitativa la naturaleza y magnitud de los efectos positivos y negativos originados por el Proyecto. **4.** Establecer y definir las medidas correctoras que, siendo técnica y económicamente viables, reduzcan, eliminen o compensen los efectos ambientales significativos negativos. **5.** Proponer un Plan de Vigilancia Ambiental que se deberá seguir durante las fases de ejecución y explotación.

2.2 Metodología. Para la identificación y valoración de los impactos se empleó el método matricial de Leopold creado en 1971 por el Servicio Geológico de los EE.UU. Se trata de una matriz en la que cada elemento indica una relación de una acción de proyecto (columna) con un factor ambiental (fila). (Gómez Orea, 2002)

Una vez realizada la matriz para la identificación de los impactos, se procedió a la realización de las matrices de valoración cualitativa y cuantitativa de los mismos. Se efectuó una evaluación global que permita adquirir una visión integrada y sintética de la incidencia ambiental del proyecto.

2.3 Identificación y valoración de impactos. Para la interpretación de los factores ambientales afectados se tuvieron en cuenta las acciones, en las distintas fases del proyecto, que sobre los elementos o factores del medio tendrán repercusiones ambientales y

las alteraciones que estos últimos sufrirán. Para cada uno de los factores afectados se realizó un análisis de los tipos de efectos según su incidencia y grado de permanencia, valorando todos ellos en función de los conceptos y de la forma que se indica a continuación, según: **1.** El tipo de afección producida: *positivo o negativo*. **2.** La superficie afectada: *impacto local, regional y nacional*. **3.** el modo de incidencia: *directo o indirecto*. **4.** La duración: *temporal o permanente*. **5.** la reversibilidad: *reversible o irreversible*. **6.** la magnitud: *compatible, moderado, severo o crítico*. Para cada factor del medio se reflejó el tipo de efecto y su descripción, las acciones susceptibles de producir efectos en las distintas fases y su valoración en función de los conceptos anteriormente citados.

2.4 Alcance de la EIA. Para la realización y cumplimiento de los objetivos fijados anteriormente se estructuró el alcance y los contenidos del proyecto en cinco etapas diferenciadas:

Descripción del Proyecto. En esta primera fase se describen las estructuras que componen el proyecto, analizando las acciones que tienen una mayor incidencia en el medioambiente: localización, análisis de las posibles alternativas y justificación de la elegida, relación de las materias primas y residuos generados durante la construcción y funcionamiento de las instalaciones.

Inventario Ambiental. Basado en la recopilación bibliográfica y en consultas realizadas a expertos, Organismos e Instituciones relacionadas con el proyecto (Cartas de suelos, 2005), así como en trabajos de campo realizados y en la descripción de los elementos ambientales afectados por las obras de construcción del proyecto. Se estudiaron las características climatológicas de la zona donde se va a localizar el parque eólico, para una mejor selección de las especies que se utilizarán en las labores de restauración de los terrenos afectados. También se recogieron las características litológicas, geomorfológicas, edafológicas, hidrológicas, faunísticas y de vegetación de la zona de estudio (Blarasin et al, 2003). Este inventario se amplió con un estudio detallado de paisaje y de la incidencia de los aerogeneradores sobre el mismo. En esta fase también se estudiaron las características socioeconómicas de los alrededores donde se enclava el proyecto.

Identificación y Valoración de Impactos. Se identificaron y valoraron los posibles impactos asociados a las tres fases del proyecto (construcción, explotación y abandono). Se utilizaron matrices simplificadas de identificación y valoración de impactos directos o primarios.

Medidas Preventivas y Correctoras. Se propusieron soluciones para prevenir, corregir o minimizar los impactos significativos.

Programa de Vigilancia Ambiental. Se propuso un plan de vigilancia para asegurar el cumplimiento de las medidas correctoras propuestas en la etapa anterior. Se propone realizar un seguimiento de los efectos ambientales que se producen en todas las fases del proyecto (construcción, explotación y abandono).

3. Parámetros básicos del Proyecto

3.1 Ubicación geográfica

El proyecto se ubica en la Pedanía 3 de Febrero, Departamento de Río Cuarto. Altura del sitio: 367 m SNM. Coordenadas geográficas: 33° 44' 58,4" S; 64° 46' 44,2" W. Puntos de Referencia: Coronel Moldes, Washington. Allí se desarrollará el parque eólico "La Laguna".

3.2 Componentes del sistema eólico

El parque eólico constará de 30 Aerogeneradores clase 2, Vestas V-90, de 95 m de altura de buje, de 2 MW de potencia cada uno, haciendo un total de 60 MW. La descripción técnica de los componentes principales se encuentra en <http://www.vestas.com/es/comunicación/catálogos.aspx>.

3.3 Componentes del Sistema de electrólisis.

Alimentación. El sistema se basa en una alimentación de un equipo electrolizador, en forma independiente de la red. La capacidad total de producción de hidrógeno es de 10.780 kg/día. El sistema electrolizador es bi-polar y alcalino (Tipo Atmosférica N° 5040 - 5150 amperios de CC) con un total de 10 unidades, cada una capaz de producir 1.046 kg de hidrógeno por día - 485 Nm³/hora de H₂ (H₂A Analysis). Considerando un factor de capacidad de generación eólica del parque de FC = 0.4, el mismo produciría 576.000 kWh/día. Esta disponibilidad de energía eólica es del orden necesario para la producción de los 10.780 kg/día. Las unidades electrolizadoras utilizan agua procesada para la electrólisis y agua de refrigeración para el enfriamiento. El electrolito en el sistema es KOH. El sistema incluye los siguientes equipos: Transformadores, Tiristor, Unidad Electrolizadora, cisterna de lejía, agua de alimentación desmineralizada, depurador de hidrógeno, Contenedor de gas, dos compresores de a 30 bares, desoxidante. El sistema electrolizador recibe electricidad de corriente alterna CA del parque eólico que se convierte a través de los sub-sistemas del transformador y rectificador en electricidad de corriente continua CC para el uso del sistema electrolizador. El sub-sistema Transformador está inmerso en un baño de aceite y se enfría mediante un equipo de aire acondicionado. El sub-sistema Rectificador convierte la CA en CC utilizando tiristores. La refrigeración se logra a través de aire forzado por un ventilador de enfriamiento ubicado en la parte inferior de la caja del rectificador.

Consumo de agua. El sistema electrolizador requiere agua de alta pureza para asegurar un correcto desempeño. El agua para el proceso se desmineraliza y ablanda a una resistencia específica de 1 a 2 Megaohmios/cm en una unidad desmineralizadora de agua. El sistema requiere 1 L de agua desmineralizada por Nm³ de H₂ producido (470.700 L/día de agua para 52.300 kg de H₂/día) y 100 L de agua de refrigeración por Nm³ de H₂.

Almacenamiento. El sistema electrolizador produce hidrógeno y oxígeno mediante la electrólisis del agua de alimentación. El gas de cada celda del sistema electrolizador se recoge en canales de flujo de hidrógeno y oxígeno en forma separada. El sistema modelado no captura el gas de oxígeno, pero la captura del gas oxígeno de alta pureza es una posibilidad. El H₂ se inyecta al subsistema depurador de gases y luego se comprime a 30 bares. Después de la compresión, el oxígeno residual se elimina del H₂ mediante la unidad desoxidante y este se seca en el secador de doble torre.

3.4 Análisis Económico de contorno

En analogía con lo realizado en la literatura (Ivy Levene, 2005), consideraremos el efecto del precio de la electricidad sobre el costo del hidrógeno, teniendo en cuenta los electrolizadores de diferentes compañías, cuyas eficiencias están entre 54 y 67 kWh/kg. Dado que el poder calorífico superior es de 39 kWh/kg, esto corresponde a eficiencias entre el 58 y el 72 %. Las curvas se muestran en la figura 1.

¡Error! Vínculo no válido.

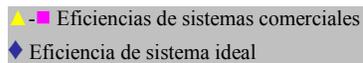


Figura 1: Costos de hidrógeno vía electrólisis calculados a partir de los costos de electricidad solamente. No se han tenido en cuenta costos de capital, de operación ni de mantenimiento.

Del análisis de los datos de la figura 1 podemos concluir que a partir del empleo de electrolizadores con un requerimiento energético de 54 a 67 kWh/kg el costo de la electricidad debe ser menor que 20-26 centavos para producir hidrógeno a un costo menor que los 14 pesos. Para un sistema ideal operando al 100 % de eficiencia el costo de la electricidad debe ser menor que los 36 centavos. Estos resultados muestran que existe un límite para el mejoramiento del costo del hidrógeno según incremente la eficiencia del electrolizador, dado que termodinámicamente los electrolizadores no pueden ser más eficientes que la línea ideal mostrada en la figura 2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis del recurso eólico

Los resultados obtenidos a partir del análisis arriba descrito en el punto 1 se muestran en la figura 2 y los mismos indican que existirían recursos eólicos considerables, superiores a cien millones de MWh en ocho departamentos: General Roca, Roque Saenz Peña, Unión, Marcos Juárez, Juárez Celman, San Justo, Río Primero y Río Cuarto; siendo este último el departamento con mayor energía anual disponible: 3.9×10^8 MWh/año.

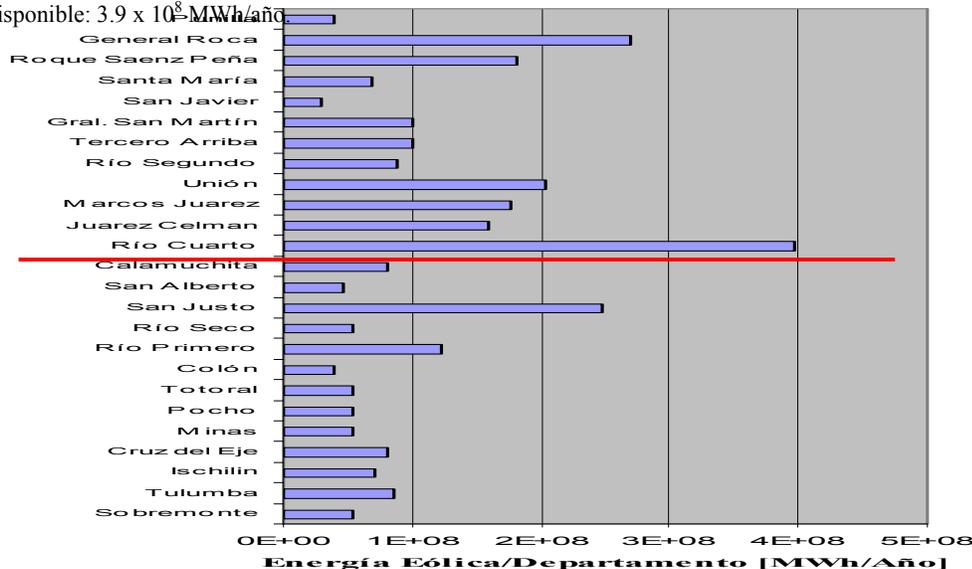


Figura 2: Energía eólica anual por departamento de la provincia de Córdoba.

4.2 Análisis de la producción de hidrógeno

A partir de los resultados del potencial de energía eólica analizados en el punto 4.1, se consideró su conversión en producción anual de hidrógeno. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Departamento	Energía por Depto. [MWh/año]	Producción de hidrógeno [kg/año]	Área por Depto. [km ²]	Energía específica por Depto. [MWh/año/ km ²]	FC %	<vel> (m/s)	D. Pot. (W/m ²)
Sobremonte	5,41E+07	1,03E+09	3199,5	1,69E+04	40.20	7.61	468.47
Tulumba	8,51E+07	1,62E+09	5493,2	1,55E+04	38.15	7.42	404.70
Ischilín	7,00E+07	1,33E+09	4588	1,53E+04	34.63	7.02	338.98
Cruz del Eje	8,14E+07	1,55E+09	5872,5	1,39E+04	34.72	6.81	361.94
Minas	5,49E+07	1,05E+09	3590,5	1,53E+04	32.44	6.62	360.59
Pocho	5,31E+07	1,01E+09	3121,05	1,70E+04	37.74	7.00	431.27
Totoral	5,29E+07	1,01E+09	2943,4	1,80E+04	39.01	7.53	417.06
Colón	3,88E+07	7,39E+08	2214	1,75E+04	42.38	7.63	502.98
Río Primero	1,24E+08	2,35E+09	6458,9	1,91E+04	41.42	7.65	459.91
Río Seco	5,33E+07	1,01E+09	2709,4	1,97E+04	45.03	8.06	530.70
San Justo	2,48E+08	4,73E+09	12898	1,92E+04	43.97	7.85	501.03
San Alberto	4,78E+07	9,10E+08	2514	1,90E+04	43.08	7.51	549.39
Calamuchita	8,06E+07	1,53E+09	4491	1,79E+04	43.30	8.26	659.38
Río Cuarto	3,98E+08	7,57E+09	18409	2,16E+04	48.79	8.31	673.49
Juárez Celman	1,61E+08	3,06E+09	7774	2,06E+04	47.14	8.38	658.71
Marcos Juárez	1,75E+08	3,34E+09	9309	1,88E+04	41.88	7.74	560.05
Unión	2,03E+08	3,86E+09	10640	1,90E+04	43.69	7.83	514.26
Río Segundo	8,91E+07	1,70E+09	4991	1,78E+04	39.03	7.40	417.24
Tercero Arriba	1,01E+08	1,92E+09	5058	2,00E+04	46.58	8.08	610.48
Gral. San Martín	1,02E+08	1,94E+09	5051	2,01E+04	45.98	8.11	549.94
San Javier	2,89E+07	5,50E+08	1559	1,85E+04	42.32	7.63	529.14
Santa María	6,78E+07	1,29E+09	2996	2,26E+04	50.76	8.84	861.17
Roque S. Peña	1,82E+08	3,46E+09	8252	2,20E+04	50.25	8.65	836.93
Punilla	2,68E+08	5,11E+09	2331	1,73E+04	41.57	7.49	488.86
General Roca	4,03E+07	7,67E+08	12731	2,11E+04	48.15	8.01	639.97

Tabla 1: Relación entre la cantidad de energía eólica anual que podría generarse por departamento de la provincia de Córdoba y la producción de hidrógeno. Se considera la velocidad del viento a 95 m de altura. Se incluyen además el factor de capacidad para una turbina Vestas V-90 de 2 MW (FC %), la velocidad media anual a esa altura (<vel>) y la densidad de potencia media (D. Pot.).

4.3 Análisis del flujo de efectivo descontado

En adición al análisis de contorno del costo de la electricidad, se utilizó un análisis de flujo de efectivo descontado para determinar el costo de producción de hidrógeno vía electrólisis. Para ello se utilizó como herramienta el **modelo H2A** del Departamento de Energía de Estados Unidos (H2A Análisis), diseñado para la producción central de hidrógeno. Los parámetros clave utilizados en este análisis se muestran en la tabla 2.

El análisis de la figura 1 demostró que el costo de la electricidad es una contribución fundamental al costo de producción de hidrógeno electrolítico. De modo que para realizar el análisis con el modelo H2A, previamente se utilizó el Software de **Análisis de Proyectos de Energía Limpia RETScreen** (<http://www.retscreen.net/>) el cual es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, desarrollada para evaluar la producción de energía y ahorros, costos de ciclo de vida, reducción de emisiones, aspectos financieros y de riesgo de varios tipos de tecnologías de energía eficiente y renovables. Con la ayuda de este programa, se determinó el costo umbral del MWh de energía eólica (Valor Presente Neto Nulo) de modo que a partir del mismo el proyecto de instalación del parque sea rentable, esto es 27,59 [US\$/MWh]. Los parámetros financieros utilizados en el modelo fueron: tasa de inflación: 18%, tasa de descuento: 18%, tasa de interés: 6%, costo kW instalado: 2.200 [US\$/kW]. En la tabla 3 se muestran los resultados del uso secuencial de ambos modelos enunciados anteriormente, donde se registró el cambio del costo del hidrógeno en función del costo de la energía eléctrica.

Parámetros	Valores Supuestos
Parámetros de procesos	
Alimentación primaria	Electricidad y agua
Electricidad	Eólica
Tecnología de conversión	Electrólisis
%Pureza del hidrógeno	99,8
Consumo de electricidad	52,5 [kWh/kg]

Tabla2: Parámetros utilizados en el análisis del flujo de efectivo descontado para determinar el costo de producción de hidrógeno vía electrólisis.

El costo del hidrógeno se informa en dólares y en pesos y también se compara con el costo -equivalente en energía- de 1 litro de nafta, en pesos. Recordando que la producción de hidrógeno se tornaría competitiva con un costo del hidrógeno ubicado entre los \$12-16/kg, como se mencionó anteriormente, podemos concluir del análisis de la tabla 3 que esta situación comienza a ser factible con un costo de la energía eléctrica por debajo de ca 50 US\$/MWh, los que comparados con el costo de 70 US\$/MWh de energía eléctrica convencional resultan en una opción conveniente y atractiva para la producción de hidrógeno vía energía eólica.

4.4 Análisis del Impacto Ambiental

En las tablas que se muestran a continuación se resumen los resultados de la EIA. Primeramente en la tabla 4 se identifican las actividades impactantes del proyecto y en las tablas 5, 6 y 7 se muestran las matrices Causa – Efecto de Impacto Ambiental en las fases de construcción, operación y abandono, respectivamente. En la tabla 8 se muestran los criterios tomados para la clasificación de los impactos.

ETAPA	ACTIVIDADES	ETAPA	ACTIVIDADES	
C O N S T R U C C I Ó N	Construcción de accesos internos y externos	OPERACIÓN	Presencia física del parque eólico	
	Remoción de la cubierta vegetal		Movimiento de las palas	
	Movimientos de tierra		Presencia del tendido eléctrico	
	Transporte de equipos y materiales		Generación de energía	
	Construcción de obrador y parque de maquinarias		Uso del recurso agua para la producción de hidrógeno	
	Excavaciones para fundaciones		Mantenimiento de aerogeneradores	
	Construcción de instalaciones de control		Generación de residuos	
	Construcción de fundaciones para aerogeneradores		Uso de vehículos	
	Montaje de aerogeneradores		ETAPA	ACTIVIDADES
	Montaje de equipos electromecánicos		ABANDONO	Actividades de desmantelamiento de las instalaciones
	Tendido de líneas de transmisión eléctrica.		Eventual remediación de pasivos ambientales	
	Almacenamiento de materiales y residuos		Uso de vehículos y equipos pesados	
	Pruebas y puesta en servicio			
Incremento de tráfico				
Demanda de mano de obra.				

Tabla 4: Identificación de las actividades impactantes del proyecto en las diferentes etapas

Componentes	Acciones impactantes		Factores impactados															
			Construcción e accesos internos y externos	Remoción de la cubierta vegetal	Movimientos de tierra	Transporte de equipos y materiales	Construcción de obrador y parque de maquinarias	Excavaciones para fundaciones	Construcción de instalaciones de control	Construcción de fundaciones para aerogeneradores	Montaje de aerogeneradores	Montaje de equipos electromecánicos	Tendido de líneas de transmisión eléctrica.	Almacenamiento de materiales y residuos	Pruebas y puesta en servicio	Incremento de tráfico	Demanda de mano de obra	
Medio Físico	Atmósfera	Calidad de aire	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3		-1 3		-1 3						-1 3	-7 21	
		Ruido	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3					-1 3	-1 3	-11 33
	Hidrología	Cambio escurrimiento	-2 2	-2 2	-2 2		-1 3	-2 2	-1 3	-1 3				-1 3				-12 20
		Calidad de agua	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3	-1 3			-1 3		-1 3		-11 33
	Paisaje	Calidad	-1 3	-1 3	-1 3		-1 3	-1 3	-1 3	-1 3				-1 3				-8 24
	Suelo	Calidad	-1	-1	-1			-1	-1	-1								-6

			3	3	3			3	3	3									18
		Ocupación del suelo	-1			-1	-1		-1	-1	-1	-1		-1		-1			-9
			3			3	3		3	3	3	3		3		3			-27
Medio Biológico	Fauna	Desplazamiento	-2	-2	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-2								-16
			2	2	2	2	3	2	3	2	2								20
Flora	Cobertura		-2	-2	-2		-1	-2	-1					-1					-11
			2	2	2		3	2	3					3					17
Humano	Socio - Económico	Población																2	2
																		2	2
		Agropecuaria	-1				-1		-1					-1					-4
			3				3		3					3					12
			-13	-11	-11	-6	-8	-11	-9	-9	-5	-1		-6	-1	-4		2	
			27	21	21	14	24	21	27	23	11	3		18	3	12		2	

Tabla 5. Matriz Causa – Efecto de Impacto Ambiental. Etapa de Construcción

COMPONENTES		ACCIONES DEL PROYECTO									
MEDIO FÍSICO	FACTORES IMPACTADOS	ACCIONES IMPACTANTES								Resumen	
		Funcionamiento del parque eólico	Presencia del parque eólico	Generación de residuos	Demanda de mano de obra	Rotura de los aerogeneradores	Funcionamiento de los electrolizadores	Almacenamiento de Hidrógeno			
ATMÓSFERA	Calidad de aire	7					-1	-1	-2	-6	
	Ruido	2					3	3	6		
HIDROLOGÍA	Consumo de agua						-2	2	-5		
	Calidad de agua			-1		-2		-3	7		
PAISAJE	Calidad		-3	-1				-1	-6		
			1	3			3	7	7		
SUELO	Calidad			-1		-1		-2	-2		
BIOLÓGICO	FAUNA	Desplazamiento							6	6	
									2	2	
HUMANO	SOCIO-ECONÓMICO	Población				1			1	0	
		Agropecuaria	-1			3			3	6	
			-5	-3	-3	1	-3	-3	-3		
			7	1	9	3	5	5	9		

Tabla 6: Matriz Causa - Efecto de Impacto Ambiental. Etapa de Operación

COMPONENTES		ACCIONES DEL PROYECTO			
MEDIO FÍSICO	FACTORES IMPACTADOS	ACCIONES IMPACTANTES		Resumen	
		Desmantelamiento de las instalaciones	Generación de residuos	Demanda de mano de obra	
ATMÓSFERA	Calidad de aire	-1			-1
		3			3
HIDROLOGÍA	Ruido	-1			-1
		3			3
BIOLÓGICO	FAUNA	Desplazamiento			
HUMANO	SOCIO-ECONÓMICO	Empleo			2
					2
			-3	-1	2
			9	3	2

Tabla 7: Matriz Causa - Efecto de Impacto Ambiental. Etapa de Abandono

PONDERACION DE IMPACTOS		IMPORTANCIA DEL IMPACTO		CATEGORIA	
Impacto Débil	1	Importancia alta	1	INAPRECIABLE	
Impacto Moderado	2	Importancia media	2	NO SIGNIFICATIVO	NS
Impacto Fuerte	3	Importancia baja	3	MODERADO	M
				SIGNIFICATIVO NEGATIVO	SN
Impacto Positivo +				SIGNIFICATIVO POSITIVO	
Impacto Negativo -				NO APLICA	

Tabla 8: Clasificación de los impactos ambientales

DISCUSIÓN

En base al análisis de los resultados mostrados en las matrices causa - efecto de impacto ambiental, se proponen las siguientes medidas correctoras así como el plan de vigilancia ambiental.

Medidas protectoras y correctoras. Se adoptaron las siguientes medidas para: **a)** la fase de construcción y **b)** de funcionamiento: **Medio ambiente atmosférico. Ruidos:** **a)** Revisión de los motores de la maquinaria. En caso de superar los 60 dB en las zonas vecinas a la obra, se adoptarán medidas adicionales. **b)** Revisión de los niveles comprometidos por el fabricante de los aerogeneradores. **Polvo y gases:** **a)** Revisión del correcto funcionamiento de los motores de la maquinaria. Riego de las superficies afectadas por los movimientos de maquinaria y tierras. **b)** No se prevén efectos significativos. **Medio edáfico. Accesos, caminos y zanjas:** **a)** Se utilizarán en la medida posible los viales preexistentes. **b)** No se permitirá el paso de vehículos fuera de las rutas diseñados al efecto. **Erosión:** **a)** Se intentará evitar que la actividad coincida con los periodos de lluvias. Acondicionamiento y reforestación de taludes. Se compensarán los desmontes con los terraplenes. **b)** Se realizará el adecuado mantenimiento de las obras de drenaje longitudinal y transversal. **Alteración del suelo:** **a)** Los materiales de desecho, si son inertes, serán depositados en la zona definida a tal efecto, siendo llevados a un vertedero autorizado en su totalidad antes de la puesta en funcionamiento del parque. **b)** A fin de evitar la posible pérdida de aceites de las turbinas, estas cuentan con una cuba de recogida que impide su migración hasta el suelo. **Aguas:** **a)** Los accesos cuentan con las obras de drenaje necesarias para no comprometer la red de drenaje y permitir el flujo normal de las aguas. **b)** El edificio de la central cuenta con un sistema de depuración adecuado para las aguas residuales procedentes de los servicios higiénicos. **Vegetación y fauna:** **a)** Sólo se eliminará la vegetación que sea imprescindible mediante técnicas de desbroce. Una vez finalizadas las obras de infraestructura y en lo posible coincidiendo con ellas, se procederá a la reforestación de las superficies afectadas mediante la descompactación y reposición de la capa de suelo previamente reservada y la posterior plantación de especies propias de la zona. **b)** Se comprobará la eficiencia, viabilidad y adecuación de las plantaciones realizadas. **Paisaje:** **a)** Las instalaciones fijas se situarán en zonas poco visibles y su color será poco llamativo. **b)** Se procura que los aerogeneradores se sitúen de manera de minimizar el efecto negativo que se causa sobre el paisaje. El edificio central y los depósitos se adaptarán en materiales y acabados a las características constructivas del área del parque. Los acabados de los aerogeneradores son en tonos mate, lo que permite una cierta integración con el entorno. **Medio socioeconómico.** Se propone: La creación de un “parque abierto” promoviendo visitas concertadas, informando sobre el uso de la energía eólica, la producción de hidrógeno y su interacción con el medio natural.

Plan vigilancia ambiental. Representa un programa de seguimiento de los efectos residuales y constituye un sistema de control de la aplicación de las medidas correctoras así como una comprobación de su eficacia.

Durante la *fase de construcción* se controlará la integración en las obras de aquellas medidas correctoras que se adoptan en el EIA. Para ello se comprobará: **1.** Los niveles de ruido y adopción de medidas adicionales si fueran necesarias. **2.** El trazado y ejecución de la infraestructura de accesos, explanaciones, obras de drenaje y taludes se realizan de manera adecuada y se ajustan a las zonas previstas. **3.** El desbroce de la vegetación se hace con las técnicas adecuadas y el los lugares indicados. **4.** El correcto mantenimiento de la maquinaria. **5.** La no aparición de residuos en lugares no previstos para ello.

En la *fase de operación* empezará a actuar un programa de seguimiento de la eficacia de las medidas correctoras adoptadas y de los efectos residuales. A tal efecto se llevarán a cabo los controles que se referencian a continuación y se enviarán los informes oportunos al organismo competente de la administración con una periodicidad anual. Estos controles, que se realizarán cada dos meses, están referidos a: **1.** Alteraciones de comportamiento de las aves y mortandades por colisiones. **2.** Alteraciones de las redes de drenaje. **3.** Correcto establecimiento y evolución de la vegetación, en relación al plan de reforestación de las zonas afectadas. **4.** Niveles de ruidos producidos por el funcionamiento de las instalaciones, para lo que se establecerá un programa de mediciones a distintas distancias y teniendo en cuenta los parámetros climáticos de la zona y los núcleos de población más próximos al parque.

CONCLUSIÓN

Se realizó una estimación general de producción de hidrógeno electrolítico utilizando generación eléctrica eólica en la provincia de Córdoba. El análisis de producción de hidrógeno renovable, se basó en diferentes aspectos del sistema de electrólisis: disponibilidad del recurso eólico, análisis de costo y requerimientos anuales de energía. Cada análisis ayudó a definir los desafíos y oportunidades para que el hidrógeno producido a partir de electricidad renovable participe en una futura economía del hidrógeno. Destacamos que hemos considerado, para todas las comparaciones de este trabajo, que el costo de generación eléctrica eólica es de 27,59 [US\$/MWh]. Existe una significativa cantidad de recurso eólico y se observa que comparando los valores actuales del costo del MWh de electricidad convencional con el costo de la electricidad eólica y consecuentemente del hidrógeno con nafta y gas oil, ambas cantidades alternativas son competitivas con las convencionales. Se concluye que con la adecuada planificación de las acciones involucradas en las diferentes etapas, el proyecto puede ser ambientalmente viable y se prevé además un plan de vigilancia ambiental y medidas correctoras para el correcto funcionamiento del parque en forma integral con la producción de hidrógeno electrolítico. Cabe finalmente agregar que el presente análisis no incluye los costos de almacenamiento y transporte. Esta es una temática que debe abordarse con otras herramientas y que será realizado en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del MinCyT de la Pcia. de Córdoba y del programa BID 1728/OC-AR a través del proyecto PICTOR 936.

REFERENCIAS

Mapa Eólico Nacional, www.sigeolico.com.ar.

Anglada M. L. (1998). El Cambio Global en el Medio Ambiente. Introducción a las causas humanas. Editorial Alfaomega.

Blarasin M., Matteoda E., Cabrera A., Felizzia J., Hildmann F., Bettera A. (2003). Arsénico en aguas subterráneas del acuífero freático sedimentario de Malena, Córdoba, Argentina.

Cartas de suelos de la Provincia de Córdoba (2005). Catálogo de publicaciones de la Agencia Córdoba Ambiente.

Chialvo A. C. Hidrógeno y la Energía del Futuro (2004). Academia Nacional de Cs. E. F. y N. y Academia Nacional de Ingeniería. Serie de publicaciones científicas N° 1.

Crespo A., Migoya E., Gómez Elvira R., Veganzones C. (2003). Energías Renovables para el Desarrollo. Editorial Thomson.

De Dicco, Freda, J. F., 2004. Diagnósticos y perspectivas del abastecimiento mundial y nacional de hidrocarburos. (IDICSO) material de la Universidad del Salvador y del Instituto de Energía e Infraestructura de la Fundación A. Illia (FAI). Bs. As.

Gómez Orea D. (2002). Evaluación de Impacto Ambiental. Editorial MUNDI-PRENSA. España.

H2A Analysis webpage (2009), http://www.hydrogen.energy.gov/h2a_analysis.html

Ivy Levene J., Mann M.K., Margolis R., Milbrandt A. (2005), report for the ISES 2005 Solar World Congress Orlando, Florida August 6-12, 2005, disponible en <http://www.osti.gov/bridge>.

Menzl F., Wenzke M., Lehmann J. Hydrogen Production by windmill Powered Electrolyser (1998). Proceeding of the 12th World Hydrogen Energy Conference. Bs. As. Argentina. Vol. 1.

Renewable Energies, Innovations for the future (2006). Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Berlin, Germany. Disponible en <http://www.bmu.de>

Spinadel E. Hidrógeno y la Energía del Futuro (2004). Academia Nacional de Cs. E. F. y N. y Academia Nacional de Ingeniería. Serie de publicaciones científicas N° 1.

ABSTRACT: This paper presents the Economic and Environmental Project evaluation for installation of a wind farm in the province of Cordoba for the purpose of hydrogen production. The potential of hydrogen wind is analyzed for each department province, considering the energy requirements of the electrolyzer and the capacity factor of samples analyzed. We analyzed four aspects of system: hydrogen resource assessment, cost analysis of hydrogen production via electrolysis, wind energy requirements to produce hydrogen and annual assessment project's environmental impact. For this purpose a plant that generates a nominal power of 60 MW was modeled. From a model of cost production of energy the cost production of hydrogen was determined. This analysis should help to define the challenges and opportunities for the production of hydrogen / wind, defining a future hydrogen economy.

Keywords: Hydrogen Economy. Hydrogen / wind Production. Environment.