

## **Análisis de la producción central y la entrega de hidrógeno, aplicado al Circuito Patagónico Austral**

*Medina M.<sup>1</sup>, Abdelbaki A.<sup>1</sup>, Lorenzetti D.<sup>1</sup>, Villarroel Sáez P.<sup>2</sup>, Sigal A.<sup>3</sup>, Rodríguez C.R.<sup>4</sup>*  
*<sup>1</sup>Laboratorio de Energías Renovables (LER) - Unidad Académica Caleta Olivia - Universidad Nacional de la Patagonia Austral*  
*<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*  
*<sup>3</sup>Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba*  
*<sup>4</sup>Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba*

**Resumen:** El departamento Deseado de la Provincia de Santa Cruz, Argentina, presenta la mayor potencialidad de producción de hidrógeno electrolítico del país, a partir de las tres fuentes de energías primarias sustentables: eólica, solar, biomásica. Allí, la Planta de Hidrógeno de Pico Truncado cuenta con capacidad de producción central de hidrógeno de 100m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/día, suficiente para abastecer 353 vehículos con combustible híbrido denominado HGNC, constituido por el corte 12% V/V de hidrógeno en GNC, (*in situ*) en cada estación.

A partir del costo de producción, se analiza el costo de entrega de hidrógeno al circuito Patagónico Austral conformado por: Puerto Deseado, Fitz Roy, Caleta Olivia, Las Heras, Comodoro Rivadavia, Sarmiento y Los Antiguos. Considerando diversos parámetros locales, se determinó como forma de entrega más rentable el gasoducto virtual, con costo total de hidrógeno estimado en 6,5 USD/kg H<sub>2</sub> y de HGNC despachado en la estación en 0,50 USD/Nm<sup>3</sup>.

**Palabras Claves:** hidrógeno-GNC; transporte; sustentabilidad; Patagonia.

## Analysis of Production and Delivery Center Hydrogen Applied to the Southern Patagonian Circuit

*Medina M.<sup>1</sup>, Abdelbaki A.<sup>1</sup>, Lorenzetti D.<sup>1</sup>, Villarroel Sáez P.<sup>2</sup>, Sigal A.<sup>3</sup>, Rodríguez C.R.<sup>4</sup>*  
*<sup>1</sup>Laboratorio de Energías Renovables (LER) - Unidad Académica Caleta Olivia - Universidad Nacional de la Patagonia Austral*  
*<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*  
*<sup>3</sup>Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba*  
*<sup>4</sup>Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba*

**Abstract:** The Desire department of the province of Santa Cruz, Argentina, presents the greatest potential electrolytic Hydrogen Production Country, From Three primary sources of sustainable energy: wind, solar, biomass. There, the Hydrogen Plant of Pico Truncado has capacity central production of hydrogen  $100\text{m}^3$  of  $\text{H}_2$  / day, enough to supply 353 vehicles with hybrid fuel called HGNC, made by cutting 12% V / V of hydrogen in CNG (in situ) at each station.

Puerto Deseado, Fitz Roy, Caleta Olivia, Las Heras, Comodoro Rivadavia, Sarmiento and the Ancients: From the production cost, the cost of delivering hydrogen to the Southern Patagonian circuit comprised analyzed. Considering various local parameters are determined as a way of delivering more profitable virtual pipeline, with total cost of hydrogen estimated 6.5 USD / kg  $\text{H}_2$  and HGNC shipped in the station at 0.50 USD /  $\text{Nm}^3$ .

**Keywords:** Hydrogen-CNG; transport; sustainability; Patagonia.

## INTRODUCCIÓN

En el año 1983, organismos privados y estatales de Argentina, en el marco de la ampliación de reservas de Gas Natural (GN), que había tenido lugar en la década anterior, impulsaron un cambio en la matriz energética del país. Este proceso se llevó a cabo a través de una mayor participación del Gas Natural Comprimido (GNC), mediante su distribución por gasoductos que atraviesan gran parte del país de sur a norte y de oeste a este (Cámara Argentina del GNC).

Esta situación condujo al desarrollo del combustible con aplicación al transporte automotor, sustituyendo derivados del petróleo por gas natural comprimido vehicular, decisión conocida como el *Plan Nacional De Sustitución De Combustibles Líquidos*, en cuya elaboración participaron las empresas *YPF* y *Gas del Estado* con la colaboración de diversos sectores privados. Actualmente, la proporción de gas natural en la matriz energética nacional para la oferta interna de energía primaria supera el 50%. Las aplicaciones de este combustible fósil tienen lugar en los sectores residencial e industrial además del de transporte. Para abastecer al parque automotor nacional cercano a 2 millones de vehículos usuarios de GNC, se utiliza alrededor del 7% del total de gas natural. Consecuentemente, se ha impulsado enérgicamente el desarrollo de una infraestructura del GNC, así como también de las tecnologías asociadas al uso del combustible. Así, hasta 2007, Argentina figuraba como el país con más vehículos a GNC en el mundo. La situación descrita plantea una posibilidad en la cual el país también puede constituirse en pionero, al plantear el corte de GNC con hidrógeno (HGNC), persiguiendo una intención alineada, en algunos aspectos, con el corte de combustibles líquidos a través de biocombustibles. Si bien el hidrógeno se puede producir mediante diversas fuentes de energías primarias, una situación estratégica se visualiza vinculando su producción al uso de fuentes renovables (FR), permitiendo mayor racionalidad en el consumo de Gas Natural, cuya naturaleza es no renovable, y dando lugar al avance de Generación Distribuida (GD) de energía. Habiendo tomando esta iniciativa, luego de años de experimentación y desarrollo junto con la Asociación Argentina del Hidrógeno, en la Planta Experimental de Hidrógeno de Pico Truncado, departamento Deseado, provincia de Santa Cruz, Argentina, una estación de servicio con tecnología nacional está empezando a suministrar HCNG. El primer objetivo es la evaluación y optimización de los efectos del uso del combustible de mezcla (con hidrógeno producido a partir de energías renovables respetuosas del medio ambiente) para luego extender la adopción de HCNG a casi todos los coches de la flota de la ciudad (Asociación Argentina del Hidrógeno) (Fuel Cell Works).

En consonancia con este proceso y con el fin de analizar las oportunidades de implementación de una futura economía del hidrógeno en Argentina, en un trabajo previo (Sigal et al. 2015) hemos estimado el costo de producción y entrega de hidrógeno en la provincia de Córdoba, con hidrógeno producido a partir de una planta central eólica instalada en la mejor zona de viento de la provincia. A partir del costo de producción central de Hidrógeno en la Planta de Pico Truncado, en el presente trabajo, se analiza el costo de entrega de hidrógeno al *Circuito Patagónico Austral* conformado por: Puerto Deseado, Fitz Roy, Caleta Olivia, Las Heras, Comodoro Rivadavia, Sarmiento y Los Antiguos. Se considera la capacidad actual de la Planta a fin de examinar la cantidad de vehículos que puede abastecer con HGNC y se dimensiona el tamaño que debiera tener para abastecer al 10% del parque automotor total del Circuito Patagónico. Asimismo, se dimensiona la capacidad instalada que debiera tener un

parque eólico, asumiendo que toda su producción se destina a la generación de hidrógeno electrolítico eólico.

### ***Energías renovables en Argentina y producción de hidrógeno eólico***

En el país, existe un alto potencial de fuentes energéticas renovables (Energía limpia XXI 2014) y con ellas, es posible establecer escenarios tecnológica y económicamente factibles, con grandes ventajas ambientales, para impulsar su realización, en general poco materializada. Como ejemplo de ello, en la región austral del país, las condiciones de viento son tales que ubican a la Patagonia argentina entre las zonas más aptas del planeta para la producción y aprovechamiento de la energía eólica. Esta información se desprende de los altos valores del Factor de Capacidad (FC, energía generada por unidad de potencia nominal) que indican que los mismos podrían duplicar los promedios mundiales (Cámara argentina de energías renovables 2009).

Esto motivó a otro estudio previo (Sigal et al. 2014) en el cual analizamos detalladamente la potencialidad de producción de hidrógeno a partir de los tres principales recursos renovables (eólico, solar y biomásico) en el país, poniendo de relieve el hecho de que en cada una de las provincias el país tiene al menos un departamento donde esta potencialidad supera 10 veces sus necesidades de consumo de combustible fósil. Argentina podría producir casi mil millones de toneladas métricas por año de hidrógeno renovable. Este es el mismo potencial estimado para los Estados Unidos (Gas y Negocio), un país que tiene una superficie 3,5 veces mayor que Argentina.

Teniendo en cuenta la cantidad de HGNC (con 20% V/V de hidrógeno) para movilizar el parque total de vehículos a combustión interna movilizadas por GNC y considerando que el consumo de GNC en el país fue de 2650 millones m<sup>3</sup>/año (tomando el año 2010 como referencia), la cantidad de hidrógeno requerida sería 595.000 toneladas/año. El uso de alrededor del 12% de la tierra apta para proyectos de energías renovables, dada la potencialidad de muchos departamentos distribuidos a lo largo del territorio nacional, sería suficiente para generar esta cantidad. Alternativamente, esta cuantía de hidrógeno podría ser entregada usando sólo 2% de la superficie total del departamento de Deseado.

## **METODOLOGÍA**

### ***Producción de hidrógeno en zonas de alto factor de capacidad eólico de la República Argentina***

El potencial de producción de hidrógeno electrolítico, como estrategia de almacenamiento energético, a partir de la explotación de recursos eólicos de excelente calidad, fue estudiado por primera vez para regiones australes del continente americano, en particular, para las provincias de la República Argentina que presentan altos Factores de Capacidad eólicos (estimados a 60 m de altura sobre el suelo) y baja densidad poblacional, por Patricia Alejandra Villarroel Sáez en su trabajo de tesis de Maestría en Ingeniería Mención Ambiente (Villarroel Sáez 2013), en la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

El análisis involucró las siguientes etapas: (1) la medición de áreas de igual densidad de potencia eólica promedio en cada provincia, con DPE > 300 W/m<sup>2</sup> y FC eólicos ≥ 35%; (2) la

evaluación de los recursos eólicos en los sitios seleccionados y el cálculo de la energía eólica anual disponible en cada uno de ellos, mediante el uso del SIG Eólico Nacional (SIG Eólico); (3) la determinación de los requerimientos energéticos del proceso de electrólisis; (4) la determinación del costo de generación de electricidad eólica, utilizando el programa RETScreen® (Natural Resources Canada); (5) la estimación del costo de producción de hidrógeno electrolítico con electricidad de origen eólico, con ayuda del Modelo H2A® (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy); y (6) la vinculación de los costos de producción de hidrógeno con el potencial de producción en cada provincia, en términos anuales y per cápita. Las provincias evaluadas como zonas de alto Factor de Capacidad eólico fueron: San Juan, Córdoba, San Luis, Buenos Aires, La Pampa, Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego.

Simulando mediante el uso de RETScreen® un parque eólico de 60 MW de capacidad instalada, se calculó que los costos de producción de electricidad eólica en las zonas de alto Factor de Capacidad eólico de la República Argentina varían entre 25 y 36 USD/MWh, para FC eólicos  $\geq 35\%$ . Se obtuvo una relación entre el FC eólico de cada sitio estudiado y el costo de producción de hidrógeno en un sistema integrado de electrólisis renovable alimentado con electricidad eólica. El resultado muestra que, a mayor FC eólico, se obtiene un menor costo de producción de hidrógeno, para distintas eficiencias de electrólisis ( $e$ ). Para un sistema electrolizador con una eficiencia típica de 52,5 kWh/kg de H<sub>2</sub> (75%) y un FC eólico (a 60 m de altura) de 35%, el costo del hidrógeno para las provincias estudiadas es 3,55 USD/kg de H<sub>2</sub>. El costo más bajo de producción de hidrógeno, para  $\eta = 75\%$ , fue 2,78 USD/kg de H<sub>2</sub>, mientras que para  $\eta = 85\%$ , el costo más bajo de producción de hidrógeno fue 2,63 USD/kg de H<sub>2</sub>. Estos valores fueron obtenidos en sitios evaluados dentro de las provincias de Santa Cruz y Chubut, para FC eólicos de 63% (estimados a 60 m de altura). Más aún, estas provincias presentan los mejores potenciales relativos de hidrógeno eólico, con 76.631 kg de H<sub>2</sub>/año por habitante y 33.491 kg de H<sub>2</sub>/año por habitante, respectivamente. Estos valores son esperables para el territorio patagónico, debido a los altos FC eólicos registrados allí, mientras que sitios de la provincia de San Luis arrojaron resultados prometedores, con un alto potencial relativo de hidrógeno eólico de aproximadamente 21.500 kg/año por habitante.

En conjunto, todas las provincias estudiadas ofrecen un potencial de producción de hidrógeno eólico de  $1,4 \times 10^{11}$  kg de hidrógeno al año (para  $\eta = 75\%$ ), lo que se traduce en un potencial relativo promedio de 6.260 kg H<sub>2</sub> por habitante, para un suministro potencial de electricidad eólica anual generada a 60 m de altura sobre el suelo.

### ***Producción de hidrógeno. Planta Experimental de Pico Truncado***

La Planta, ubicada en un predio de dos hectáreas y una superficie cubierta de 800 m<sup>2</sup>, se inauguró en diciembre de 2005. El parque eólico Jorge Romanutti, emplazado en las cercanías de aquella, cuenta con cuatro aerogeneradores de 600 kW cada uno, dando una potencia total instalada de 2,4 MW. Al inicio de las actividades de la planta, se experimentó exitosamente en un motor de combustión interna de un automóvil Renault 9, haciéndolo funcionar con hidrógeno puro. Luego de esta experiencia, se realizó la adaptación del motor de una camioneta con HGNC producido en la planta. Posteriormente, la municipalidad se dotó de dos vehículos más (un Gol y una camioneta Kangoo) y finalmente, la Seccional Primera de la Policía de Pico Truncado también adquirió dos autos híbridos, un Gol y un Corsa.

Actualmente, una investigadora de la planta cuenta con su vehículo propio funcionando con la mezcla gaseosa, gracias a una reciente adaptación de HGNC, donde la mezcla cuenta con 1,5% (en masa) de hidrógeno en GNC, lo que representa un 12% en volumen.

La planta, a punto de entrar en una etapa industrial, cuenta con un electrolizador capaz de generar 100 m<sup>3</sup>/h a 18 bar. Este hidrógeno se mezcla con GN proveniente de la red y se almacena a 170 bar para su futuro uso como HGNC. La capacidad diaria de producción de hidrógeno es 254 m<sup>3</sup>/día (880 kg/día) a 170 bar, equivalente a un volumen de HGNC de 2.117 m<sup>3</sup>/día para entregar a las estaciones de servicio.

El oxígeno producido por la electrólisis, de calidad medicinal, será entregado al hospital de la localidad santacruceña.

### ***Entrega de hidrógeno: transporte y distribución***

La *entrega* de hidrógeno consiste en el *transporte y la distribución* del mismo mediante infraestructuras y procesos que incluyen tuberías, camiones, sistemas de almacenamiento, electricidad, compresores y surtidores. La elección para el modo de producción de hidrógeno puede generar un gran impacto sobre el costo y la modalidad de entrega. La producción centralizada de grandes cantidades de hidrógeno quizá disminuya los costos de obtención, sin embargo, acrecienta los costos de entrega debido a la lejanía con los puntos de uso final. La descentralización de plantas de producción de hidrógeno, que podemos denominar como “generación distribuida de hidrógeno”, implica costos mayores de producción por tratarse de menores escalas, mientras que se economiza en la entrega por estar cerca de los centros de consumo.

La entrega de hidrógeno puede realizarse básicamente mediante tres alternativas:

- Gasoductos, tuberías, tubos y módulos transportables en tráilers de camiones con hidrógeno gaseoso comprimido puro o mezclado con gas natural (hidrógeno gaseoso);
- Tanques criogénicos con hidrógeno licuado transportados en camiones, barcos, buques o ferrocarriles (hidrógeno líquido);
- Portadores de energía de alta densidad como metanol, etanol o derivados de biomasa renovable que pueden ser transportados y reformados *in situ* para su uso final (portadores de hidrógeno).

La elección de la opción óptima dependerá de la cantidad de hidrógeno que deba despacharse y las distancias a las que se deba transportar y distribuir.

### ***Comparación de costos***

En un trabajo reciente (Yang y Ogden 2007) se comparan camiones de gas comprimido, camiones de líquido criogénico y gasoductos, como modos de entrega de hidrógeno para diferentes características geográficas y de mercado. Mediante modelos que estiman costos y caracterizan distancias para transporte, se determina la forma de entrega más rentable, para cada caso particular. El estudio considera parámetros como población, densidad de población, tamaño de la ciudad, número de estaciones de servicio de GNC disponibles que podrían ser adaptadas para el despacho de hidrógeno, y demanda de energía para el sector transporte GNC.

Con respecto a la distribución, se utiliza un modelo de ciudad circular idealizada, con una red homogénea de estaciones de servicio. Los resultados de los costos de distribución de hidrógeno se representan como función del número de estaciones y del radio de la ciudad circular, considerando capacidades de las estaciones de servicio de 500 kg/día y 1800 kg/día.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Recursos eólicos en la provincia de Santa Cruz

Siguiendo la metodología empleada en el trabajo de tesis de Villarroel Sáez, el potencial eólico estimado para la provincia equivale a 3.985 MWh/año por habitante. En la Figura 1, se muestra la energía disponible anualmente por área equipotencial en Santa Cruz.

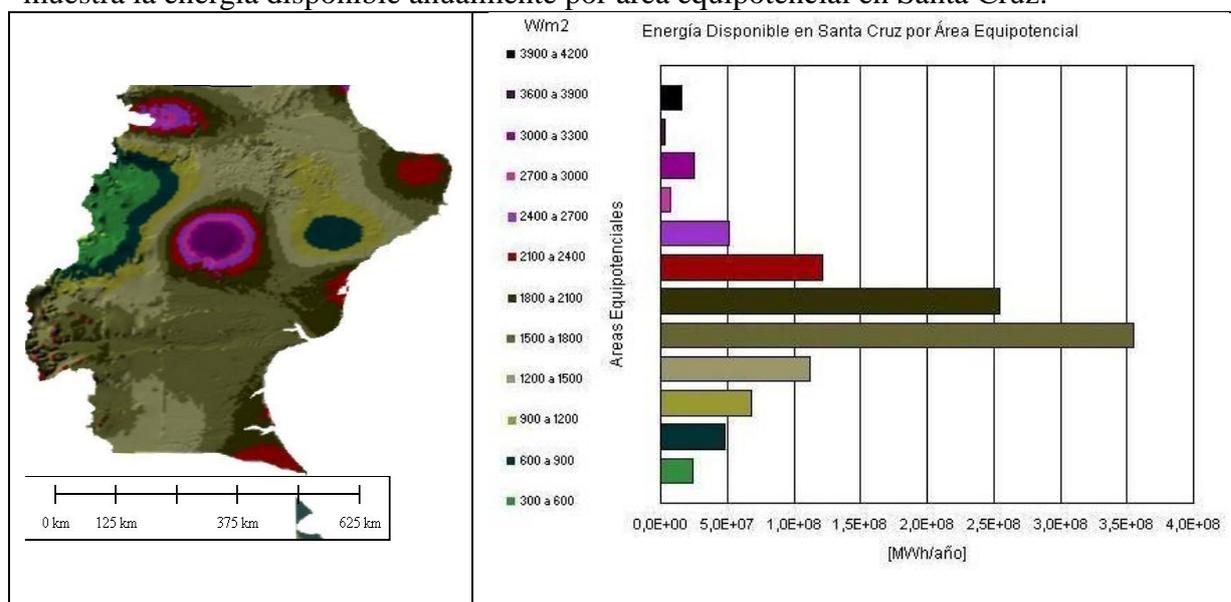


Figura 1 - Energía eólica anual disponible en la provincia de Santa Cruz por área equipotencial

En general, la provincia (46°- 50° L.S.) presenta condiciones inmejorables del recurso eólico, con un 83% de su territorio aprovechable equivalente a un potencial de 3.985 MWh/año por habitante y FC eólico de más de 60%. Estos datos son presentados en la Tabla 1. Las áreas protegidas nacionales Monte León y Bosques Petrificados, además de las zonas protegidas en los Bosques Patagónicos de Los Andes, fueron excluidas del análisis.

Referencia geográfica		$A_i$	$U_m$	$DPE$	$E_{turbina}$	$E_i$	FC (%)
Latitud	Longitud	km <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	MWh/año	MWh/año	
-49° 58' 14"	-69° 19' 41"	22.094	10,8	1.661	2.247	1,24E+08	57
-49° 46' 52"	-68° 0' 23"	3.004	11,6	2.057	2.366	1,78E+07	60
-49° 30' 24"	-67° 44' 2"	230	12,2	2.343	2.416	1,39E+06	61
-48° 17' 24"	-68° 10' 1"	956	8,7	822	1.781	4,26E+06	45
-47° 55' 23"	-67° 48' 47"	8.093	9,7	1.175	2.050	4,15E+07	52
-46° 59' 8"	-67° 42' 37"	30.814	10,6	1.508	2.177	1,68E+08	55
-47° 20' 0"	-67° 7' 52"	1.161	11,3	1.816	2.356	6,84E+06	60
-47° 21' 14"	-66° 49' 34"	4.915	12,2	2.190	2.427	2,98E+07	62

-47° 23' 12"	-66° 17' 53"	3.363	12,6	2.423	2.468	2,07E+07	63
-48° 16' 17"	-69° 34' 45"	190	13,2	3.015	2.008	9,55E+05	51
-48° 22' 32"	-69° 24' 47"	519	12,9	2.793	2.053	2,66E+06	52
-51° 29' 17"	-70° 40' 53"	9.799	10,5	1.552	2.138	5,24E+07	54
-51° 0' 4"	-70° 1' 31"	12.272	11,1	1.823	2.192	6,73E+07	56
-51° 23' 26"	-69° 27' 59"	5.104	11,4	2.150	2.191	2,80E+07	56
-52° 1' 48"	-68° 57' 15"	2.590	12,1	2.464	2.321	1,50E+07	59
-48° 46' 46"	-72° 23' 54"	535	7,9	605	1.389	1,86E+06	35
-48° 56' 1"	-72° 3' 6"	1.138	8,8	776	1.548	4,41E+06	39
-49° 13' 10"	-71° 52' 10"	1.371	9,8	1.207	1.974	6,76E+06	50
-49° 22' 13"	-71° 31' 38"	6.130	10,5	1.485	2.071	3,17E+07	53
-50° 10' 37"	-71° 20' 43"	17.336	11,0	1.804	2.209	9,57E+07	56
-49° 53' 18"	-72° 35' 35"	1.337	12,2	2.174	2.126	7,10E+06	54
-47° 11' 58"	-71° 22' 48"	1.473	9,0	890	1.651	6,08E+06	42
-47° 29' 58"	-70° 25' 13"	2.569	9,9	1.191	1.887	1,21E+07	48
-47° 18' 5"	-70° 9' 35"	6.189	10,4	1.382	1.954	3,02E+07	50
-46° 16' 50"	-69° 49' 59"	3.931	11,8	2.192	2.082	2,05E+07	53
-46° 34' 12"	-70° 0' 44"	3.962	11,6	2.146	2.143	2,12E+07	54
-46° 40' 36"	-70° 33' 11"	3.012	12,1	2.454	2.059	1,55E+07	52
-46° 29' 29"	-70° 37' 60"	1.545	12,9	3.068	2.032	7,85E+06	52
-46° 32' 27"	-70° 50' 22"	493	13,0	3.172	2.033	2,51E+06	52
-48° 25' 18"	-67° 50' 59"	2.836	8,1	670	1.945	1,38E+07	42
-48° 31' 49"	-67° 12' 45"	2.100	9,9	1.215	2.130	1,12E+07	54
-48° 46' 21"	-68° 36' 19"	2.742	10,5	1.481	2.174	1,49E+07	55
-49° 7' 5"	-68° 44' 1"	4.281	11,3	1.852	2.258	2,42E+07	57
-49° 5' 1"	-69° 15' 8"	4.570	11,5	2.012	2.553	2,92E+07	57
-48° 48' 25"	-69° 19' 53"	805	12,2	2.370	2.171	4,37E+06	55
-48° 44' 0"	-69° 32' 35"	962	12,8	2.867	2.136	5,14E+06	54
-48° 30' 54"	-69° 40' 47"	609	13,9	3.643	1.965	2,99E+06	50
-48° 13' 3"	-71° 53' 4"	7.533	7,4	521	1.303	2,45E+07	33
-48° 27' 45"	-71° 33' 53"	4.472	8,6	773	1.572	1,76E+07	40
-48° 10' 14"	-71° 9' 1"	3.009	9,6	1.142	1.870	1,41E+07	47
-48° 54' 33"	-71° 13' 14"	3.360	10,2	1.408	2.054	1,73E+07	52
-48° 41' 6"	-71° 1' 15"	2.089	11,1	1.794	2.068	1,08E+07	52
-49° 0' 28"	-70° 47' 56"	2.532	11,7	2.040	2.102	1,33E+07	53
-48° 47' 38"	-70° 47' 11"	1.764	12,1	2.394	2.103	9,27E+06	53
-48° 33' 59"	-70° 35' 33"	1.442	13,0	3.081	2.121	7,65E+06	54
-48° 46' 39"	-70° 20' 34"	1.217	13,1	3.156	2.157	6,56E+06	55
-48° 30' 18"	-70° 15' 47"	3.099	14,4	4.316	1.972	1,53E+07	50
<b>Total provincia</b>		<b>205.546</b>				<b>1,09E+09</b>	

Tabla 1 Energía eólica anual disponible en Santa Cruz. Evaluaciones a 60 m de altura del eje de la turbina, donde  $A_i$  = área equipotencial;  $U_m$  = velocidad media del viento;  $DPE$  = densidad de potencia eólica;  $E_{turbina}$  = energía eólica por turbina;  $E_i$  = energía eólica por área equipotencial (2,5 turbinas/km<sup>2</sup>) y  $FC$  = factor de capacidad eólico (%).

### Potencial de hidrógeno eólico en Santa Cruz

En la provincia de Santa Cruz, el potencial de hidrógeno eólico es el mayor del país, en referencia a la extensión disponible con recursos eólicos de excelente calidad, y a su densidad

poblacional. Este potencial equivale a 76.631 kg de H<sub>2</sub> al año por habitante (para  $\eta = 75\%$ ) y 86.626 kg de H<sub>2</sub> al año por habitante (para  $\eta = 85\%$ ). Las zonas de alto FC eólico identificadas (83% del territorio provincial) permiten obtener costos de hidrógeno eólico que varían entre 2,64 y 3,64 USD/kg de H<sub>2</sub>. En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis.

Referencia geográfica del área equipotencial		FC %	Potencial de producción [kg H <sub>2</sub> /año]		Costo E. eólica a 60 m en función del FC [USD/MWh]	Costo hidrógeno electrolítico H <sub>2</sub> A [USD/kg H <sub>2</sub> ]	
Latitud	Longitud		$\eta=75\%$	$\eta=85\%$		$\eta=75\%$	$\eta=85\%$
-49° 58' 14"	-69° 19' 41"	57	2,39E+09	2,70E+09	24,13	2,88	2,72
-49° 46' 52"	-68° 0' 23"	60	3,42E+08	3,86E+08	23,14	2,83	2,67
-49° 30' 24"	-67° 44' 2"	61	2,67E+07	3,01E+07	22,75	2,81	2,65
-48° 17' 24"	-68° 10' 1"	45	8,19E+07	9,25E+07	29,16	3,17	2,97
-47° 55' 23"	-67° 48' 47"	52	7,98E+08	9,02E+08	26,00	2,99	2,82
-46° 59' 8"	-67° 42' 37"	55	3,22E+09	3,65E+09	24,76	2,92	2,76
-47° 20' 0"	-67° 7' 52"	60	1,31E+08	1,49E+08	23,22	2,83	2,68
-47° 21' 14"	-66° 49' 34"	62	5,74E+08	6,48E+08	22,66	2,80	2,65
	<b>-66° 17'</b>						
<b>-47° 23' 12"</b>	<b>53"</b>	<b>63</b>	<b>3,99E+08</b>	<b>4,51E+08</b>	<b>22,36</b>	<b>2,78</b>	<b>2,64</b>
-48° 16' 17"	-69° 34' 45"	51	1,84E+07	2,08E+07	26,45	3,02	2,84
-48° 22' 32"	-69° 24' 47"	52	5,12E+07	5,79E+07	25,97	2,99	2,82
-51° 29' 17"	-70° 40' 53"	54	1,01E+09	1,14E+09	25,13	2,94	2,77
-51° 0' 4"	-70° 1' 31"	56	1,29E+09	1,46E+09	24,62	2,91	2,75
-51° 23' 26"	-69° 27' 59"	56	5,38E+08	6,08E+08	24,64	2,91	2,75
-52° 1' 48"	-68° 57' 15"	59	2,89E+08	3,27E+08	23,50	2,85	2,69
-48° 46' 46"	-72° 23' 54"	35	3,57E+07	4,04E+07	35,69	3,54	3,30
-48° 56' 1"	-72° 3' 6"	39	8,47E+07	9,58E+07	32,67	3,37	3,15
-49° 13' 10"	-71° 52' 10"	50	1,30E+08	1,47E+08	26,82	3,04	2,86
-49° 22' 13"	-71° 31' 38"	53	6,10E+08	6,90E+08	25,79	2,98	2,81
-50° 10' 37"	-71° 20' 43"	56	1,84E+09	2,08E+09	24,47	2,90	2,74
-49° 53' 18"	-72° 35' 35"	54	1,37E+08	1,54E+08	25,25	2,95	2,78
-47° 11' 58"	-71° 22' 48"	42	1,17E+08	1,32E+08	31,01	3,27	3,07
-47° 29' 58"	-70° 25' 13"	48	2,33E+08	2,64E+08	27,81	3,09	2,91
-47° 18' 5"	-70° 9' 35"	50	5,82E+08	6,57E+08	27,03	3,05	2,87
-46° 16' 50"	-69° 49' 59"	53	3,94E+08	4,45E+08	25,68	2,97	2,80
-46° 34' 12"	-70° 0' 44"	54	4,08E+08	4,61E+08	25,08	2,94	2,77
-46° 40' 36"	-70° 33' 11"	52	2,98E+08	3,37E+08	25,92	2,99	2,81
-46° 29' 29"	-70° 37' 60"	52	1,51E+08	1,71E+08	26,19	3,00	2,83
-46° 32' 27"	-70° 50' 22"	52	4,82E+07	5,45E+07	26,18	3,00	2,83
-48° 25' 18"	-67° 50' 59"	42	2,65E+08	3,00E+08	31,10	3,28	3,07
-48° 31' 49"	-67° 12' 45"	54	2,15E+08	2,43E+08	25,21	2,95	2,78
-48° 46' 21"	-68° 36' 19"	55	2,87E+08	3,24E+08	24,79	2,92	2,76
-49° 7' 5"	-68° 44' 1"	57	4,65E+08	5,25E+08	24,04	2,88	2,72
-49° 5' 1"	-69° 15' 8"	57	5,61E+08	6,34E+08	24,07	2,88	2,72
-48° 48' 25"	-69° 19' 53"	55	8,40E+07	9,49E+07	24,82	2,92	2,76
-48° 44' 0"	-69° 32' 35"	54	9,88E+07	1,12E+08	25,15	2,94	2,77
-48° 30' 54"	-69° 40' 47"	50	5,75E+07	6,50E+07	26,91	3,04	2,86
<b>-48° 13' 3"</b>	<b>-71° 53' 4"</b>	<b>33</b>	<b>4,72E+08</b>	<b>5,33E+08</b>	<b>37,60</b>	<b>3,64</b>	<b>3,39</b>
-48° 27' 45"	-71° 33' 53"	40	3,38E+08	3,82E+08	32,27	3,34	3,13
-48° 10' 14"	-71° 9' 1"	47	2,70E+08	3,06E+08	28,02	3,10	2,92

-48° 54' 33"	-71° 13' 14"	52	3,32E+08	3,75E+08	25,96	2,99	2,81
-48° 41' 6"	-71° 1' 15"	52	2,08E+08	2,35E+08	25,82	2,98	2,81
-49° 0' 28"	-70° 47' 56"	53	2,56E+08	2,89E+08	25,48	2,96	2,79
-48° 47' 38"	-70° 47' 11"	53	1,78E+08	2,02E+08	25,46	2,96	2,79
-48° 33' 59"	-70° 35' 33"	54	1,47E+08	1,66E+08	25,29	2,95	2,78
-48° 46' 39"	-70° 20' 34"	55	1,26E+08	1,43E+08	24,94	2,93	2,76
Total provincia			2,09E+10	2,36E+10			

Tabla 2. Potencial anual de hidrógeno en Santa Cruz. Evaluaciones a 60 m de altura del eje de la turbina\*. \*Donde FC = factor de capacidad eólico (%).

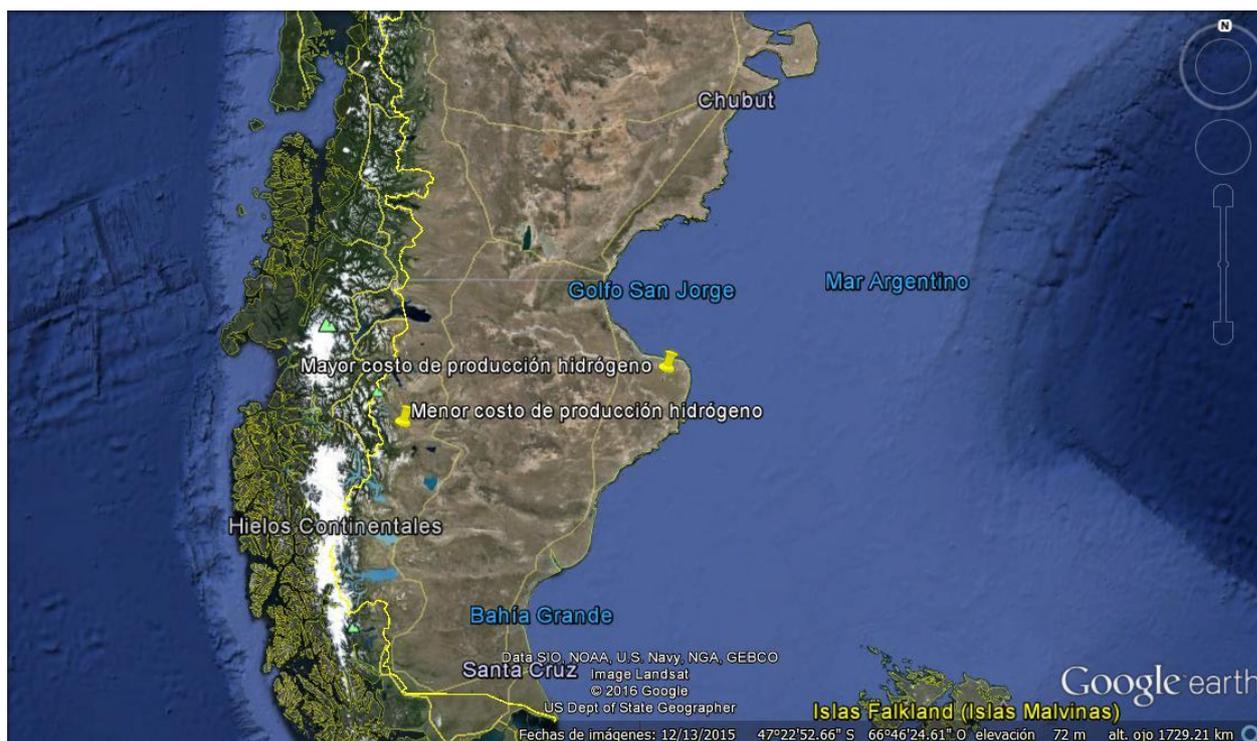


Figura 2 – Puntos en donde, dependiendo del FC, el costo de producción de producción es mayor o menor en la provincia de Santa Cruz.

### Análisis del costo de producción de hidrógeno eólico por provincia

Mediante el cálculo del costo de hidrógeno en base al costo de electricidad de origen eólico analizado en el trabajo de Rodríguez et. al (2010), correspondiente al valor umbral que haría rentable un parque eólico ( $VAN = 0$ ), el cual a su vez depende fuertemente del FC, se puede establecer una relación entre las áreas de cada provincia que tienen un factor de capacidad determinado y la repercusión en el costo de producción de hidrógeno para esa zona. Se tomaron como referencia electrolizadores comerciales que funcionan adecuadamente con  $\eta = 75\%$  y  $\eta = 85\%$ , considerándose este último valor como eficiente para este proceso. Para  $\eta = 75\%$ , los costos asociados se resumen en la Tabla 2.

FC eólico	USD/kg de hidrógeno eólico
< 30%	> 3,82
30% – 35%	3,55 – 3,82

35% – 45%	3,17 – 3,55
45% – 55%	2,92 – 3,17
55% – 60%	2,83 – 2,92
> 60%	< 2,83

Tabla 3. Costos del hidrógeno electrolítico con base en el FC eólico.

El menor costo por kilogramo de hidrógeno se obtiene en las provincias de Santa Cruz y Chubut. Para un FC eólico de 63%, este valor alcanza 2,78 USD/kg de H<sub>2</sub>. Tomando el costo actual de energía eólica como 110 USD/MWh, el costo de producción de hidrógeno eólico resulta 5,7 USD/kg H<sub>2</sub>.

### Transporte

El transporte de hidrógeno desde la planta de producción central hacia todos los depósitos, constituidos en este caso por las propias estaciones de GNC ubicadas en cada localidad, implica la conducción de 1.360 km/día, a través del sistema denominado gasoducto virtual, que para el volumen a transportar y la distancia, resulta el más económico [14]. Este costo es de 0,82 USD/kg H<sub>2</sub>. La Figura 2, tomada con ayuda de Google Maps, muestra el recorrido total desde la planta de producción central en Pico Truncado hacia las demás localidades que conforman el Circuito Patagónico Austral.

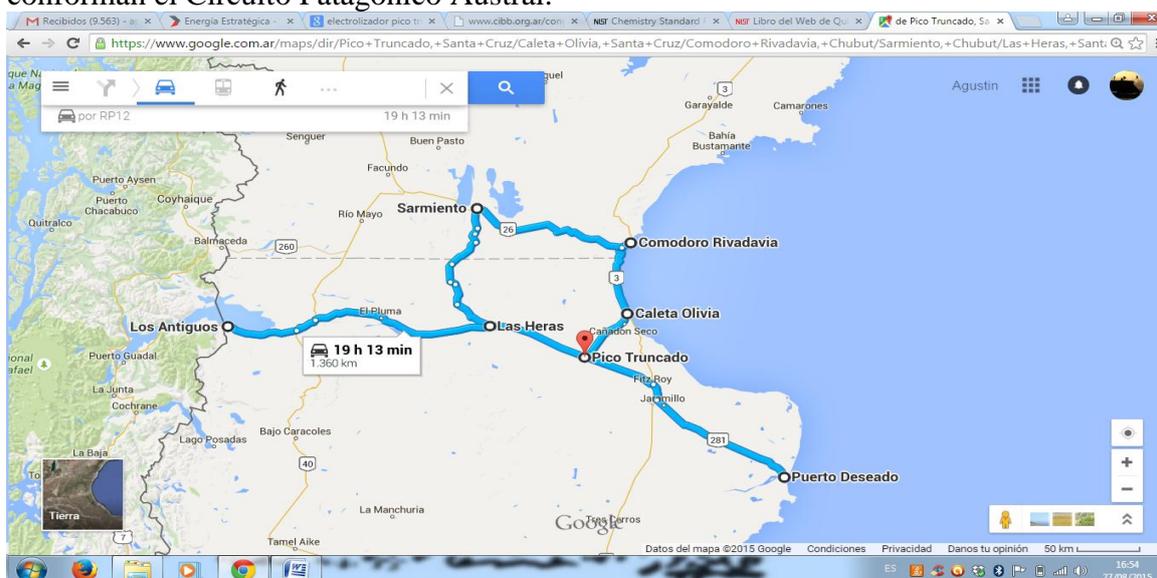


Figura 2 - bla bla

Figura 3. Recorrido necesario para el transporte de hidrógeno desde la planta de producción central, ubicada en Pico Truncado, hacia el Circuito Patagónico Austral.

### Distribución

En el Circuito Patagónico Austral considerado, donde se tomó como hipótesis la cantidad de una (1) estación de servicio en cada lugar, no es necesario establecer esquemas de distribución.

### ***Entrega***

El costo para la entrega consta en este caso particular de la suma de los costos de producción y de transporte, esto es:  $5,7 \text{ USD/kg H}_2 + 0,82 \text{ USD/kg H}_2$ , haciendo un total de  $6,52 \text{ USD/kg H}_2$ .

### ***Costo del Nm<sup>3</sup> de HGNC***

Las densidades del GN (tomado como metano puro, H<sub>4</sub>C) y la del H<sub>2</sub> en CNPT, resultan  $\delta_{\text{H4C}} = \text{PPM}/\text{RT} = 0,72 \text{ kg/m}^3$  y  $\delta_{\text{H2}} = \text{PPM}/\text{RT} = 0,09 \text{ kg/m}^3$ .

Tomando el costo de  $1 \text{ Nm}^3$  (0,72kg) de GNC = 0,48 USD (\$4,281) y el de  $1 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$  (0,09 kg \* 6,52 USD/kg) = 0,587 USD, el costo de  $1 \text{ Nm}^3$  de HGNC (88 % GNC + 12 % H<sub>2</sub>) = 0,50 USD (\$4,5), menos del 4% superior al costo del GNC puro.

### ***Proyecciones - demanda de hidrógeno y energía eólica***

Asumiendo un consumo de  $6 \text{ Nm}^3$  de HGNC cada 50 km de recorrido, para un vehículo familiar tipo, se obtiene que este volumen corresponde al promedio diario que debería cargar un vehículo perteneciente al Circuito Patagónico Austral. De este modo, la producción diaria actual de la planta de Pico Truncado podría abastecer a 353 vehículos con HGNC. Si tomamos una densidad de vehículos de 1 cada 4 habitantes, siendo la población de las localidades del Circuito Patagónico Austral de ca. 320.000, resulta una cantidad total de vehículos de transporte familiar de 80.000.

Para satisfacer el 10% de este parque automotor con HGNC, se requieren  $48.000 \text{ Nm}^3$  HGNC/día. La cantidad de H<sub>2</sub> requerida será el 12% del anterior volumen, esto es  $5.760 \text{ m}^3 \text{ H}_2/\text{día}$  (20.000 kg H<sub>2</sub>/día). Esto es, se requieren 23 electrolizadores del tipo del que se encuentra actualmente en la planta de Pico Truncado.

Para  $\eta = 75\%$ , esto implica  $52,5 \text{ kWh/kg H}_2$ , es decir, los  $20.000 \text{ kg H}_2/\text{día}$  requerirían de  $1,05 \text{ GWh/día}$  de energía. Dadas las condiciones eólicas excepcionales que se mencionaron anteriormente, se propone obtener esta energía a partir de parques eólicos conformados por aerogeneradores de 2,1 MW de potencia. Para un FC eólico -conservador- del 50%, cada aerogenerador producirá  $24 \text{ MWh/día}$ , entonces para la satisfacción energética de los  $1,05 \text{ GWh/día}$ , se requieren 44 aerogeneradores, esto es, un parque eólico semejante al ya instalado en Rawson, de la vecina provincia del Chubut, que cuenta con 43 máquinas (Instituto nacional de tecnología industrial).

## **CONCLUSIÓN**

Con el objetivo de analizar oportunidades de implementación a futuro de una “economía del hidrógeno” en Argentina, a través de la mezcla del vector energético con Gas Natural Comprimido (GNC), hemos considerado la producción central de hidrógeno y la entrega de la mezcla en el Circuito Patagónico Austral incluyendo ciudades de la zona norte de Santa Cruz y de la zona sur del Chubut. Aunque en la actualidad, la flota de vehículos a GNC no permita realizar proyecciones de las más optimistas, el potencial de la región patagónica nos da la

posibilidad de cumplir por lo menos dos metas: en primer lugar, producir hidrógeno a fin de realizar una mezcla con GNC, permitiendo ahorrar combustible fósil y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero; además, ese mismo potencial de producción masiva de hidrógeno asociado al GNC vislumbra el desarrollo de una “economía del HGNC” que podría cambiar la realidad social de la región, impulsándola hacia una penetración fuerte de este tipo de vehículos híbridos.

En la provincia de Santa Cruz, el potencial de hidrógeno eólico es el mayor del país en referencia, a la extensión disponible con recursos eólicos de excelente calidad, y a su densidad poblacional. Una faceta interesante para un próximo estudio sería realizar un análisis más profundo del recurso eólico en la región, logrando una actualización del mapa existente (SIG Eólico Nacional) para estimar de manera más precisa tanto el potencial de energía eólica como el de producción de hidrógeno.

Finalmente, si bien el costo actual de producción y distribución de hidrógeno no permite comparar ni competir con los combustibles fósiles en uso en el sector transporte, sí podemos destacar que el costo del HGNC es mucho menor que el del hidrógeno puro. Por otra parte, en un escenario donde los subsidios a los recursos fósiles no fueran tan importantes, este estudio demuestra la viabilidad del corte de GNC con hidrógeno (HGNC), agregando un nuevo combustible híbrido alineado con las políticas nacionales de sustitución de combustibles líquidos.

## AGRADECIMIENTOS

Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba (SeCyT - UNC)  
Secretaría de Ciencia y Tecnología – Unidad Académica Caleta Olivia – Universidad Nacional de la Patagonia Austral – UACO UNPA

## REFERENCIAS

- ASOCIACIÓN ARGENTINA del HIDRÓGENO. <http://www.aah2.org.ar>  
CÁMARA ARGENTINA de ENERGÍAS RENOVABLES 2009. Estado de la Energía Eólica en Argentina 2009.  
CAMARA ARGENTINA del GNC: <http://www.gnc.org.ar>  
ENERGÍA LIMPIA XXI: <http://energialimpiaparatodos.com/2014/12/07/avanza-argentina-gigantesco-potencial-eolico>  
FUEL CELL WORKS. <http://fuelcellworks.com/news/2013/10/24>  
GAS y NEGOCIOS: <http://www.gasynegocios.com/noticias/gas/argentina-ya-importa-mas-gnl-que-usa>  
INSTITUTO NACIONAL de TECNOLOGÍA INDUSTRIAL: <http://www.inti.gob.ar/renova/erEO/er21.php>  
NATURAL GAS VEHICLE KNOWLEDGE BASE: <http://www.iangv.org>  
NATURAL RESOURCES CANADA: <http://www.retscreen.net>  
OFFICE of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY: <http://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-h2a-analysis>  
RODRIGUEZ C. R., RISO M., JIMÉNEZ YOB G., OTTOGALLI R., SANTA CRUZ R., AISA S., JEANDREVIN G., LEIVA E.P.M. 2010. Analysis of the potential for

- hydrogen production in the province of Córdoba, Argentina, from wind resources *En: International journal of hydrogen energy* 35 (2010) 5952-5956
- SIG EÓLICO: <http://sigeolico.minplan.gob.ar/frameset.php>
- SIGAL A., CIOCCALE M., RODRÍGUEZ C.R., LEIVA E.P.M. 2015. Study of the natural resource and economic feasibility of the production and delivery of wind hydrogen in the province of Cordoba, Argentina *En: International journal of hydrogen energy* 40 (2015) 4413-4425
- SIGAL A., LEIVA E.P.M., RODRIGUEZ C.R. 2014. Assessment of the potential for hydrogen production from renewable resources in Argentina *En: International journal of hydrogen energy* 39 (2014) 8204-8214
- VILLAROEL SÁEZ P.A. 2013. Congreso HYFUSEN 2013 – Córdoba – Conferencia plenaria: Análisis de la producción de hidrógeno en zonas de alto factor de capacidad eólico de la república argentina
- YANG C., OGDEN J. 2007. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *En: Int. J. of Hydrogen Energy* 32, 268-86