



## Estudio de la Viabilidad Técnica y Económica del Aprovechamiento de la Energía Vertida Turbinable de la Central Hidroeléctrica de Itaipú para la Síntesis de Amoniaco para Fertilizantes Nitrogenados

**Michel Osvaldo Galeano Espínola**

Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción

**Paraguay**

### RESUMEN

En muchas centrales hidroeléctricas, cuando las afluencias de agua son mayores que la demanda de energía, una parcela de esa agua que todavía podría ser utilizada para generar electricidad es desviada para el vertedero y literalmente desperdiciada. Esa energía, cuya denominación es Energía Vertida Turbinable, podría ser aprovechada para generar algún otro producto o vector energético que posibilite su almacenamiento y posterior utilización, ya que en esas ocasiones los reservorios de agua están llenos. Este trabajo estudia la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento de la energía vertida turbinable de la Central Hidroeléctrica de Itaipú para la producción de hidrógeno electrolítico que, juntamente con el nitrógeno del aire, es materia prima esencial para la síntesis de amoniaco, utilizado en la producción de fertilizantes nitrogenados. El costo mínimo de producción de hidrógeno electrolítico fue estimado en US\$ 0,246/m<sup>3</sup> o US\$ 2,750/kg para una planta con capacidad de producción de 55 mil m<sup>3</sup>/h, correspondiendo a 247,5 MW de potencia, proveniente de 82% de energía vertida turbinable y 18% de energía garantizada. Junto a una planta de hidrógeno electrolítico de dicha capacidad, es posible acoplar una planta de amoniaco de aproximadamente 500 t/día de capacidad, operando 350 días/año, con un costo de producción en torno de US\$ 562,81/t. Con esta capacidad es posible atender 38,5% de la demanda de amoniaco estimada para la región que abarca el proyecto, de 1.300 t/día. Actualmente el amoniaco está cotizado en el mercado brasileño en torno de US\$ 525,60/t. Por lo tanto, se concluye que la producción de amoniaco vía asociación de energía garantizada y vertida turbinable junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú no es viable económicamente por el momento, debido principalmente al elevado costo de los electrolizadores importados y de la planta de separación de nitrógeno atmosférico. Sin embargo, el hidrógeno electrolítico producido es de elevada pureza y de bajo costo y podría ser vendido a las empresas distribuidoras de gas. Por otro lado, con la instalación de una planta de amoniaco electrolítico junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú serían evitados los contaminantes emitidos al usar gas natural e aún considerando las emisiones de metano y dióxido de carbono del reservorio de la usina habría una disminución en las emisiones anuales del orden de 234 mil toneladas de carbono. Caso el proyecto sea aprobado por el Mecanismo de Desarrollo Limpio, esas emisiones evitadas representarían anualmente US\$ 5,5 millones. A pesar de contar con ese posible ingreso, actualmente no sería suficiente para tornarlo viable económicamente en comparación con los procesos que utilizan combustibles fósiles a precios vigentes.

### PALABRAS CLAVES

Hidrógeno Electrolítico, Energía Vertida Turbinable, Amoniaco, Fertilizantes Nitrogenados.



## 1. INTRODUCCIÓN

La producción de hidrógeno y oxígeno vía electrolisis del agua ha sido empleada en gran escala desde principios del siglo XX, y la empresa noruega NORSK HYDRO ha utilizado ese proceso en asociación con la producción de amoníaco desde 1928, en aquella época por medio del proceso Birkeland Eide. A principios de la década de 1960, la NORSK HYDRO operaba electrolizadores con una capacidad de 100 mil m<sup>3</sup>/h, equivalente a 1.200 t/día de amoníaco. Desde entonces, parte de la producción de amoníaco ha sido realizada por medio de procesos que utilizan materias primas fósiles. Sin embargo, aproximadamente 55 mil m<sup>3</sup>/h de hidrógeno aún son producidos por medio de la electrolisis del agua, equivalentes a aproximadamente 660 t/día de amoníaco. Solamente una pequeña parte de la producción mundial de fertilizantes utiliza hidrógeno producido vía electrolisis del agua. Sin embargo, el aumento del precio de los hidrocarburos ha despertado el interés por esa tecnología para la producción de fertilizantes en pequeña escala [1].

En un sistema predominantemente hidroeléctrico uno de los principales objetivos de los reservorios en las usinas hidroeléctricas es almacenar el agua que llega en forma de caudal afluente durante los períodos en que es abundante y utilizarla en los períodos de escasez. Por ejemplo, en el sistema Sudeste brasileño, un reservorio con regularización intra-anual almacenaría el agua abundante durante los meses de diciembre a abril (período húmedo) para utilizarla en los meses de mayo a noviembre (período seco). Esto permite que durante los períodos secos el sistema hidroeléctrico sea capaz de atender una demanda firme o garantizada, bien mayor que si no existiesen los reservorios de regularización [2].

Por otro lado, cuando un reservorio alcanza su máxima capacidad de almacenamiento, no será capaz de almacenar todo el caudal afluente en un determinado intervalo de tiempo. Este exceso de afluencia será vertido. Si la demanda ya fue atendida y la usina aún posee capacidad de turbinamiento, se dice que ocurrió un vertimiento turbinable.

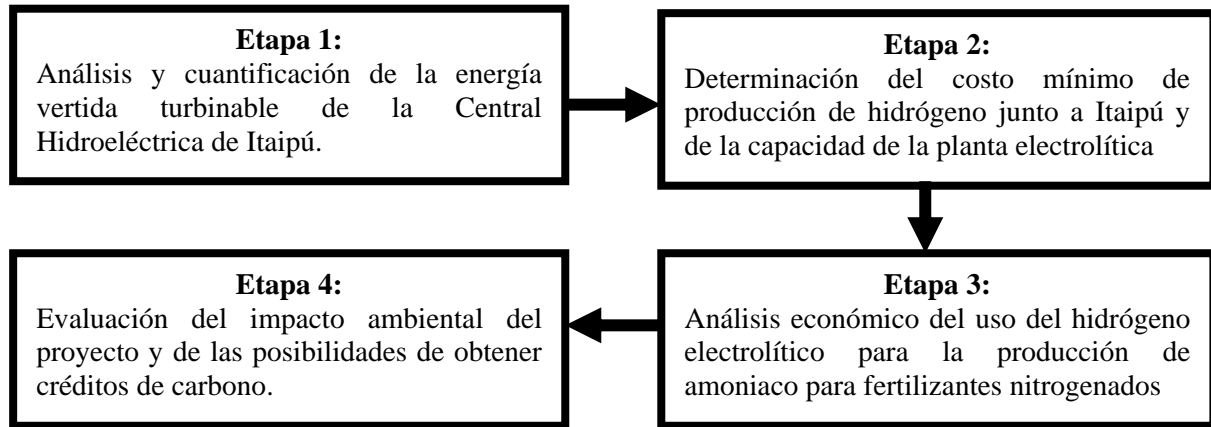
Conforme [3], considerando la utilización de la energía vertida turbinable o excedente, más barata, disponible en las centrales hidroeléctricas, aumenta la perspectiva de obtener hidrógeno electrolítico viable económicamente, considerando la importancia del costo de la energía eléctrica en el costo final de este producto.

## 2. Objetivo

El principal objetivo de este trabajo es verificar la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento de la energía vertida turbinable de la Central Hidroeléctrica de Itaipú para la producción de hidrógeno electrolítico para la síntesis de amoníaco, materia prima esencial para la producción de fertilizantes nitrogenados.

## 3. Metodología

El procedimiento propuesto en este trabajo para analizar la viabilidad de la producción de amoníaco junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú tiene la configuración presentada en la Figura I:



**Figura I:** Procedimiento propuesto para el análisis de la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento de energía vertida turbinable de la Central Hidroeléctrica de Itaipú para la síntesis de amoniaco para fertilizantes nitrogenados.

#### 4. Resultados

##### 4.1 Análisis y cuantificación de la energía vertida turbinable de la Central Hidroeléctrica de Itaipú.

La Tabla 1 presenta los registros anuales de la energía vertida turbinable disponible en la Central Hidroeléctrica de Itaipú en el período de 1991 a 2006.

**Tabla 1:** Disponibilidad de energía vertida turbinable en Itaipu entre 1991 y 2006.

Año	Energía Vertida Turbinable (TWh)	Año	Energía Vertida Turbinable (TWh)
1991	34,8	1999	5,2
1992	44,9	2000	1,0
1993	34,0	2001	1,8
1994	24,4	2002	5,2
1995	17,3	2003	4,1
1996	11,7	2004	4,0
1997	10,4	2005	5,3
1998	11,7	2006	3,6

**Fuente:** [3]

Observando la Tabla 1 se puede notar que entre los años de 1991 a 1999 se registraron grandes cantidades de energía vertida turbinable debido a la falta de mercado consumidor en esos años. En el año 2000 se registró el menor valor para la energía vertida turbinable debido al hecho de que en aquel año se registró un año hidrológico desfavorable (baja ocurrencia de lluvias). Por lo tanto, en este trabajo se consideró la disponibilidad de energía vertida turbinable entre el 1 de enero de 2001 e el 31 de marzo de 2007. La Tabla 2 muestra la disponibilidad mensual media de energía vertida turbinable de la Central Hidroeléctrica de Itaipú en el período citado anteriormente. Se observa que en los meses

**VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

de octubre a abril ocurre el mayor vertimiento, o sea, este período corresponde a la época lluviosa de la usina.

**Tabla 2:** Media mensual de energía vertida turbinable entre enero de 2001 y marzo de 2007.

Mes	GWh	Frecuencia	Mes	GWh	Frecuencia
Enero	578	14%	Julio	121	3%
Febrero	944	23%	Agosto	8	0%
Marzo	713	17%	Septiembre	26	1%
Abril	374	9%	Octubre	339	8%
Mayo	170	4%	Noviembre	280	7%
Junio	182	4%	Diciembre	339	8%
Julio	121	3%	<b>TOTAL</b>	<b>4.074</b>	<b>100%</b>

Fuente: [3]

**4.2 Determinación del costo mínimo de producción de hidrógeno electrolítico junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú y estimativa de la capacidad de producción de la planta electrolítica.**

Conforme los resultados obtenidos, el costo mínimo del hidrógeno es de US\$ 0,246/m<sup>3</sup> (US\$ 2,750/kg), obtenido para una planta electrolítica de 55 mil m<sup>3</sup>/h de capacidad y 247,5 MW de potencia, siendo alimentada con 82% de energía vertida turbinable y 18% de energía garantizada. La distribución porcentual del costo del hidrógeno electrolítico es la siguiente: 48,7% costo de capital; 19,3% costo con electricidad (electrolizadores y compresor); 16,6% costo con operación y mantenimiento de los electrolizadores; 0,3% costo con operación y mantenimiento del compresor; 15,1% costo con agua y electrolito.

**Tabla 3:** Comparación de los resultados obtenidos con los valores encontrados en la literatura técnica.

Capacidad de producción (x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /día)	Costo de la electricidad (US\$/MWh)	Costo del H <sub>2</sub> (US\$/kg)	Referencia bibliográfica
1.320,0	10,04	2,75	Elaboración propia
2.800,0	49,00	3,76	[4]
6.750,0	49,00	3,89	[5]
96,0	49,00	4,38	[6]
162,0	223,00	10,94	[7]
552,0	17,00	1,90	[8]
14,0	35,88	4,08	[9]
11,2	50,00	4,09	[10]

Como se puede observar en la Tabla 3, el valor obtenido para el costo del hidrógeno electrolítico producido junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú vía asociación de energía garantizada y vertida turbinable es coherente con los valores encontrados en la literatura. El costo del hidrógeno electrolítico producido junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú es menor comparado con las plantas de mayor capacidad de producción debido al menor costo de la electricidad disponible en Itaipú (US\$ 10,04/MWh), el cual es cinco veces menor que los valores considerados por los autores citados

(US\$ 49,00/MWh). El costo del hidrógeno electrolítico producido en plantas electrolíticas de menor capacidad de producción que la de Itaipú es mayor debido a la influencia de la economía de escala y por el costo de la electricidad considerado en esos estudios.

#### 4.3 Análisis económica de la utilización del hidrógeno electrolítico producido junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú en la síntesis de amoníaco para fertilizantes nitrogenados.

Por medio de los cálculos realizados con ayuda de la planilla electrónica desarrollada para este trabajo, se obtuvo el costo del amoníaco producido a partir de la electrólisis del agua vía asociación de energía garantizada y vertida turbinable junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú, cuyo valor es de aproximadamente US\$ 562,81/t para una planta de 500 t/día trabajando 350 días/año (8.400 h/año). La Tabla 4 permite comparar el costo del amoníaco producido vía proceso electrolítico junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú con el precio del amoníaco producido a partir de la oxidación parcial de residuo asfáltico por la empresa Fosfertil localizada en Araucaria, Estado de Paraná.

**Tabla 4:** Comparación económica del amoníaco producido junto a Itaipú y por la Fosfertil.

Fabricante	Proceso	Costo del NH <sub>3</sub> (US\$/t)
Itaipú	Electrólisis del agua	562,81
FOSFERTIL	Oxidación parcial de residuo asfáltico	525,60

Conforme [11], actualmente el amoníaco está cotizado en el mercado brasileño en US\$ 525,60/t (R\$ 1.028,00/t). Puede concluirse que el uso del hidrógeno electrolítico producido junto a Itaipú en la síntesis de amoníaco para fertilizantes nitrogenados no es viable económicamente a corto plazo. Conforme observado en la Tabla 4, el amoníaco electrolítico vía asociación de energía garantizada y vertida turbinable junto a Itaipú no puede competir, por el momento, con el amoníaco producido a partir de la oxidación parcial de residuo asfáltico por la empresa Fosfertil (PR).

#### 4.4 Evaluación del impacto ambiental y de las posibilidades de obtener créditos de carbono caso el proyecto sea aprobado por el Mecanismo de Desarrollo Limpio.

Conforme [12], la Central Hidroeléctrica de Itaipú emite anualmente 93.269 t de carbono, como se puede observar en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Central Hidroeléctrica de Itaipú y emisiones de carbono.

Parámetro	Unidad	Valor
Índice de emisión de CH <sub>4</sub>	Kg.km <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	20,8
Índice de emisión de CO <sub>2</sub>	Kg.km <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	171
Emisión de carbono de la hidroeléctrica*	t/año	93.269

\*Inclui o carbono del CH<sub>4</sub> (con GWP conforme IPCC, 1996) y del CO<sub>2</sub>: (CH<sub>4</sub> x 12/16 x 7,6 + CO<sub>2</sub> x 12/44) x 365/1000.

Fuente: [12]

Para la producción de una tonelada de amoníaco vía reforma de hidrocarburos ligeros son emitidas aproximadamente 0,706 t de dióxido de carbono [8]. Una planta de amoníaco de 500 t/día a partir de la reforma a vapor del gas natural emitiría anualmente 327.500 t de carbono. Por lo tanto, se puede concluir que con la instalación de una planta de amoníaco producido a partir de la electrólisis del agua junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú y considerando las emisiones anuales de metano y dióxido de carbono del reservatorio de la usina sería evitada una emisión anual de 234.231 t de carbono. Caso

el proyecto sea aprobado por el Mecanismo de Desarrollo Limpio, esa disminución del impacto ambiental representaría un monto anual de US\$ 5,5 millones aproximadamente.

## 5. Discusión

Conforme los resultados obtenidos, el costo mínimo del hidrógeno fue de US\$ 0,246/m<sup>3</sup> (US\$ 2,750/kg) para una planta electrolítica de 55 mil m<sup>3</sup>/h de capacidad y 247,5 MW de potencia, siendo alimentada con 82% de energía vertida turbinable y 18% de energía garantizada. El componente más importante en el costo final del hidrógeno electrolítico es el costo del capital invertido en los electrolizadores importados. Además, el alto costo final del amoniaco electrolítico también es debido al alto costo de inversión en la planta de separación de nitrógeno atmosférico. Conforme [13], el gas natural tiene ventajas sobre otras materias primas, cuando disponibles, no solamente debido a aquellas asociadas a la tecnología de producción propiamente dichas, como también a las asociadas a la extracción, producción y transporte del gas. Al compararse la inversión en unidades de amoniaco, asociado a la materia prima, se observa que la unidad de amoniaco que procesa gas natural es la que presenta menor inversión. La mayor inversión en las plantas de generación de gas de síntesis por los procesos de oxidación parcial, electrólisis y gasificación de carbón es debido a la planta de separación de aire en sus componentes (nitrógeno y oxígeno). A pesar de que el costo del amoniaco electrolítico no sea competitivo por el momento, el costo del hidrógeno electrolítico producido junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú es económicamente competitivo y ambientalmente atrayente comparado con el hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles.

## 6. Conclusiones

A partir de los resultados presentados, se puede concluir que la determinación de un valor de la disponibilidad de la energía vertida turbinable que podría ser utilizada en la producción de hidrógeno electrolítico para la síntesis de amoniaco para fertilizantes nitrogenados junto a la Central Hidroeléctrica de Itaipú no es trivial, dado que la distribución de frecuencias de la energía vertida turbinable es bastante asimétrica, presentando también dispersión elevada.

La disponibilidad anual de energía vertida turbinable en la Central Hidroeléctrica de Itaipú está en torno de 4,0 TWh. Los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril presentan mayor disponibilidad de energía vertida turbinable debido a la mayor incidencia de lluvias; ya los demás meses son secos.

En este trabajo fue verificado que el principal factor responsable por el elevado costo del hidrógeno electrolítico es el alto costo de los electrolizadores importados. El costo de la electricidad no tiene un impacto significativo. Además, incluso para una disponibilidad de energía eléctrica a costo nulo, el costo de producción de hidrógeno electrolítico reflejaría la amortización de la inversión, operación y mantenimiento e insumos de materiales. La sumatoria de estas parcelas, independientemente de la energía eléctrica, disminuye con el aumento de la escala de producción. Esa disminución está de acuerdo con los datos encontrados en la revisión de la literatura técnica, una vez que por lo menos dos de las parcelas, operación y mantenimiento y costos de capital, tienden realmente a disminuir, en términos de US\$/m<sup>3</sup> de hidrógeno producido, en la medida en que se aumenta la escala de producción.

Es importante resaltar que el oxígeno electrolítico, subproducto en el proceso de obtención del hidrógeno a partir de la electrólisis del agua, también puede ser almacenado y comercializado, aumentando las oportunidades de negocios en las centrales hidroeléctricas.



## 7. Agradecimientos

ITAIPU BINACIONAL.

Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción.

Laboratorio de Hidrógeno del Instituto “Gleb Wathagin” de la Universidad Estadual de Campinas, Estado de São Paulo, Brasil.

## 8. Referencias

- [1] GRUNDT, T. e CHRISTIANSEN, H.; Hydrogen by Water Electrolysis as Basis for Small Scale Ammonia Production. A Comparison with Hydrocarbon based Technologies, “International Journal of Hydrogen Energy”, 1982, Vol. 7, No. 3, pp. 247-257.
- [2] ALMEIDA, T.; “Análise e Quantificação da Energia Vertida Turbinável no Sistema Sudeste Brasileiro”, Monografía de Trabajo Final de Curso submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica do Curso de Graduação do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro, CEFET/RJ, 2003, 80 p.
- [3] SANTOS Jr., A. C. F.; “Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio em usinas hidrelétricas: estudo de caso em Itaipu”. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção).
- [4] KIRK-OTHMER; “Encyclopedia of Chemical Technology”, 4<sup>th</sup> edition, Vol. 13, Helium Group of Hypnotics, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [5] FOSTER-WHEELER, IEA, Greenhouse Gas R&D Programme, “Decarbonisation of Fossil Fuels”, Report No. PH2/2, March, 1996.
- [6] ANDREASSEN, K.; “Hydrogen Production by Electrolysis”, Hydrogen Power: Theoretical and Engineering Solutions. Kuwic Academic Publishers, the Netherlands, 1998, pp. 91 – 102.
- [7] SILVA, E. P.; Analysis of hydrogen production from combined photovoltaic, wind energy and secondary hydroelectricity in Brazil, “International Journal of Hydrogen Energy”, 2005, Vol. 78, pp. 670-677.
- [8] SOUZA, S. N. M.; “Aproveitamento da Energia Hidroelétrica Secundária para Produção de Hidrogênio Eletrolítico”. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998. 192p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos).
- [9] JOHANSSON, K.; “Hydrogen as a fuel for turbines and engines”, Sycon Energikonsult AB, Turbin & Processteknik Report, February 24, 1999.
- [10] LEVENE, J. e RAMSDEN, T.; “Summary of Electrolytic Hydrogen Production”. National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, MP-560-41099, 2007.
- [11] FOSFERTIL. Disponible en <http://www.fosfertil.com.br>
- [12] COPPE; Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidrelétricos Brasileiros, “Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa”, Relatórios de Referência, Ministério de Ciência e Tecnologia, 2006.
- [27] CEKINSKI, E.; “Tecnologia de Fertilizantes”, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1990.