

Utilización de los excedentes hidroenergéticos para la producción de hidrógeno verde en Paraguay.

Enrique Buzarquis¹, Gustavo Riveros¹, Massimo Rivarolo²

¹Parque Tecnológico Itaipu - ²Universitá di Genova

¹Paraguay, ²Italia

Resumen

El Paraguay es un país con características muy particulares en lo que se refiere a su desarrollo eléctrico y sus relaciones con el progreso socioeconómico. Posee una ventaja comparativa y competitiva crucial en la actualidad: abundancia de energía eléctrica generada a partir del aprovechamiento de una fuente renovable de energía (la hidroenergía). Su sistema eléctrico cuenta con una generación exclusivamente hidroeléctrica.

Este contexto energético permite al Paraguay contar con importantes excedentes de energía eléctrica, lo cual facultaría disponer de alternativas de infraestructura necesaria para la producción de hidrógeno verde por medio de la electrólisis del agua. Estas condiciones energéticas del Paraguay lo presentan como el ideal para implementar la producción y el uso de combustibles limpios, por la ventaja de la energía renovable en abundancia.

Por otro lado, el uso de hidrógeno verde, se presenta como una alternativa promisoría en la búsqueda de una economía de bajas emisiones de carbono. En este contexto, este vector de energía ha captado la atención de los responsables políticos y técnicos, especialmente debido al potencial a largo plazo para producir grandes cantidades de hidrógeno verde en condiciones competitivas y la posibilidad de establecerse como un gran exportador a nivel mundial.

Además, el hidrógeno presenta la ventaja de almacenamiento y distribución, lo cual constituye un elemento clave de la economía del hidrógeno. El uso generalizado y flexible del hidrógeno como vector energético permite que el exceso de producción sirva para su utilización posterior.

Para que todo ello repercuta en la transición hacia energías limpias, los actores de uso final también deberían beneficiarse de las ventajas competitivas en la producción de hidrógeno, puesto que ayudaría a reducir las emisiones, además de encontrar nuevas oportunidades y generar empleo. La versatilidad del hidrógeno como vector energético permite que el país adapte su estrategia de despliegue a su contexto y a sus prioridades a largo plazo, lo cual supone una oportunidad de aprovechar las ventajas estratégicas citadas anteriormente.

Sin embargo, la generación de hidrógeno conlleva una utilización importante de recursos eléctricos, por lo que, a la larga, esta producción competirá directamente con la utilización de esta energía en los sectores de consumo.

A partir de este escenario, este trabajo, presenta las proyecciones de consumo de energía eléctrica, y la posibilidad de producción de hidrógeno a medida que ésta vaya en aumento.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Como resultado final se presenta la cantidad energética disponible para la producción de hidrógeno, teniendo en cuenta el margen de reserva y las posibles instalaciones de generación previstas en el Plan Maestro de Generación de la ANDE.

Palabras clave

Excedentes Eléctricos, Hidroenergía, Hidrógeno, Electrólisis, Electrolizador AEL

1. INTRODUCCIÓN

El Paraguay dispone de un recurso estratégico sumamente valioso para su desarrollo socioeconómico presente y futuro: la hidroelectricidad. En ese sentido, el uso de la electricidad en un país está directamente asociado con incrementos en los índices de desarrollo social (IDH) y de crecimiento económico (PIB) [1]. Su riqueza hídrica en aguas superficiales y subterráneas es la mayor de Latinoamérica y cuenta con importantes posibilidades de aprovechamiento, posibilitando un amplio margen para la inversión nacional y extranjera [2].

En el sector energético de Paraguay, la producción de energía primaria está compuesta exclusivamente por fuentes renovables de energía, hidroenergía y biomasa, siendo el 65% del abastecimiento primario energético en el país, la energía hidráulica [1].

El sector energético del Paraguay presenta un caso discordante. La producción nacional de energía primaria se basa totalmente en fuentes de energía renovables: la energía hidroeléctrica y la biomasa - en teoría renovable bajo políticas de manejo sustentable de bosques-. Siendo uno de los mayores generadores de energía hidroeléctrica per cápita del mundo, obtiene su energía de plantas hidroeléctricas construidas en asociación con Brasil (Itaipú) y Argentina (Yacyreta) con una participación del 50% en cada proyecto. La operación de las centrales hidroeléctricas binacionales supone casi el 95% del consumo eléctrico local, el 5% restante es abastecido desde la central Acaray [3].

El uso estratégico del excedente de hidroelectricidad que actualmente es exportado, es clave para redireccionar el proceso de desarrollo económico y social del Paraguay, si se adopta una estrategia de reutilización de este excedente para impulsar actividades que apoyen al desarrollo socioeconómico, entre ellos, la producción de hidrógeno verde.

2. EXCEDENTES ELÉCTRICOS DEL PARAGUAY

En el Paraguay el consumo de electricidad por persona es de los más bajos de la región. Como ejemplo, mientras en Paraguay esta cifra no alcanza los 1.400 kWh/año; los habitantes de Argentina y Uruguay consumen cerca de 2.000 kWh/año en promedio [4].

Debido a que la disponibilidad de hidroelectricidad es ampliamente superior a la demanda interna del país, Paraguay exporta cerca del 62% de lo que genera, lo que lo convierte en uno de los principales exportadores per cápita de hidroelectricidad del mundo. En el año 2020, la generación bruta a nivel nacional alcanzó 46.372,96 GWh. Ese año, la energía no utilizada y exportada fue de 28.472,99 GWh (61,4%) [5].

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

En el año 2020, debido a la bajante de los ríos, las tres centrales hidroeléctricas que abastecen el sistema nacional decrecen su generación bruta, siendo la central Acaray la que mayor caída manifiesta (- 40,9 %), seguida de la central Yacyreta (-14,0 %) y la central Itaipú (- 3,7 %) con respecto al año 2019 [5].

Esta situación no es favorable para Paraguay. No aprovechar al máximo su excedente de electricidad, incluso en condiciones ambientales desfavorables, además de la participación significativa de la biomasa no sostenible y de las fuentes de energía basadas en el petróleo; es un claro desequilibrio que perjudica la seguridad energética del país, la sostenibilidad de su matriz energética en detrimento del medio ambiente y la calidad de vida de la población, abarcando así todos los frentes: social, económico y ambiental.

3. SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

3.1 Abastecimiento eléctrico y diagnóstico del sistema eléctrico nacional

La legislación que rige al sector eléctrico paraguayo norma el régimen jurídico de sus principales actores. Dentro de ese marco, la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), empresa estatal, tiene exclusividad en las actividades de prestación del servicio eléctrico, y posee el derecho de aprovechar los recursos hídricos para abastecer la demanda eléctrica del país. Las Entidades Binacionales que son actores relevantes del sector, operan las centrales Itaipú y Yacyreta, están regidas por el derecho internacional. Existen adicionalmente pequeños distribuidores¹ que actúan como compradores de energía de ANDE.

Paraguay tiene un gran potencial de hidroelectricidad. Se estima que podría producir 100 TWh/año de Electricidad, incluyendo a los 60 TWh ya disponibles (aunque no utilizados en su totalidad en el mercado nacional), que le permiten transformarse en uno de los principales exportadores de energía eléctrica del mundo (totalmente hidroeléctrica).

La electricidad constituye el 19% de la demanda final de energía y se observa un significativo potencial de penetración en los distintos sectores [5].

Un breve panorama del sistema eléctrico paraguayo indica las siguientes características:

- El sistema de generación ampliamente excedentario, está conformado por centrales hidroeléctricas (nacional y binacionales) y desde el año algunas pequeñas centrales térmicas.
- El sistema de transmisión es básicamente de 220 kV (4727 km), y opera en dos subsistemas separados (debido a que Itaipú y Yacyreta hasta la fecha no pueden funcionar en paralelo de manera definitiva). Uno de ellos, el Subsistema 1 (S1), abarca los Sistemas Este, Central, Norte, parte del Sur y mayor parte del subsistema Metropolitano. Desde el año 2013 fue puesta en marcha la línea de 500 kV (364 km) que une Itaipú con Villa Hayes (S1). Al año 2020, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) cuenta con 727 km de líneas de transmisión en 500 kV gracias a la puesta en funcionamiento de la Línea de Transmisión que va de Yacyreta a Villa Hayes. El Subsistema 2 (S2), está abastecido por la CH de Yacyreta, opera interconectado

¹ Entre esas distribuidoras se encuentran: la distribuidora Luz y Fuerza S. A. (CLYFSA), que compra energía en bloque a ANDE a 66kV, abastece 14.000 usuarios, y está ubicada en Villarrica a 200 km de Asunción; y las Cooperativas Menonitas ubicadas en la región occidental.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

sincrónicamente con SADI argentino, e incluye parte del Sistema Sur y parte del Sistema Metropolitano (LT 220 kV doble terna Ayolas – San Patricio – Guarambaré).

- En distribución existe una importante red, concentrada en preponderantemente en el Área Metropolitana. La misma presenta dos niveles de tensión: media tensión con 23 kV; y baja tensión con 380/220 V. El sistema de distribución cuenta con 90.585 transformadores y una capacidad de transformación de 7.039 MVA y 68.633 km de líneas.
- Adicionalmente, se observan elevados niveles de pérdidas, técnicas y no técnicas, que afectan los ingresos de la empresa ANDE. En transmisión las pérdidas alcanzan el 5% de la demanda, y en distribución aproximadamente el 18,5%.

3.2 Potencia instalada

La evolución de la potencia instalada eléctrica disponible es muy importante y supera ampliamente los niveles de demanda del sistema paraguayo, generándose un elevado nivel de reserva (223%).

Las centrales conectadas al Sistema Eléctrico Nacional son las binacionales administradas por los entes correspondientes de cada central (Itaipú y Yacyretá); Acaray (de ANDE), la potencia instalada y la disponibilidad para el SIN se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Centrales de generación eléctrica del Sistema Interconectado 2020 [3].

Centrales Hidroeléctricas	Potencia (MW)	Nominal Paraguay (MW)
Itaipú	14.000	7.000
Yacyreta	3.200	1.600
Acaray	210	210
Total	17.410	8.810

3.3 Proyección de la demanda y abastecimiento eléctrico

Según la última Prospectiva realizada por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) [6] en su escenario tendencial, el consumo de electricidad irá en paulatino aumento. Los valores referidos al consumo de energía eléctrica están descritos en la Tabla II.

Tabla II. Proyección de la demanda de energía eléctrica [GWh]

Año	2.018	2.023	2.030	2.040	2.050
Electricidad	12.988,50	14.687,64	18.285,50	24.611,64	32.636,22

Como se puede observar, según las proyecciones de consumo, dada la capacidad instalada de las centrales hidroeléctricas, para el año 2050 aún se contaría con un excedente importante de energía eléctrica, el cual está en condiciones de ser aprovechado. En este punto es importante aclarar que si bien, es posible contar con excedentes de energía, según informes de la ANDE, mucho antes el SIN necesitaría de capacidad adicional para abastecer en horas de punta a la demanda eléctrica.

En ese sentido, la ANDE prevé la expansión del sistema de Generación, con la instalación de nuevas centrales basadas en Energías Renovables [6]. El resumen de los proyectos se describe en la Tabla III [7].

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Tabla III. Resumen del Plan Maestro de Generación de la ANDE.

Periodo o año	Central Potencia Agregada	[MW]
2027/2030	CH Acaray	200
2024/2026	CH Aña Cuá	135
2035	CH Río Paraguay A	72
2039	CH Río Paraguay B	72
2021/2029	Centrales Fotovoltaicas	425
2021/2031	Centrales Híbridas	5,03
2025/2033	PCH	203,44
Total		1.112,47

4. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Las principales agencias de energía como IRENA y la IEA plantean que el hidrógeno debe tener un papel fundamental en la transición energética como vector potencial para la descarbonización de la economía. El hidrógeno, al ser un combustible versátil de alto contenido energético, puede ser utilizado en diversa industria como para la producción de energía, químicos, fertilizantes, entre otros [8].

La producción libre de emisiones de carbono del hidrógeno verde es realizada por la electrólisis del agua a partir de fuentes de energías renovables. En ese sentido, Paraguay tiene gran potencial y oportunidad de ser productor de este combustible debido a contar con una matriz energética mayormente renovable.

En lo que respecta a normativa nacional, existe una ausencia de regulación específica para el hidrógeno en aplicaciones energéticas. La normativa aplicable dentro de este campo está recogida en otros sectores, aplicables a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno.

4.1 Costo de producción del hidrógeno

Los costos nivelados de producción del hidrógeno para varios casos, están vinculados a las variaciones en los costos de instalación - CAPEX, precio de la electricidad comprada y el porcentaje de carga que debe emplearse. Como se presenta en [2], tanto las horas de funcionamiento como el costo de la electricidad son cruciales en el costo final del hidrógeno producido.

Los costos utilizados para este estudio están resumidos en [2]. Se prevé la utilización de Electrolizador Alcalino del TIPO AEL con el costo promedio de instalación de 1.310 U\$D/MW de capacidad. Con este valor de instalación, el costo de producción del Hidrógeno Verde es de 2,8 U\$D /kg (teniendo en cuenta el costo de la energía definido en el pliego de Tarifas 21 de la ANDE). La electrólisis alcalina AEL, como es comúnmente conocida la tecnología de electrolito líquido alcalina (AEL), se ha convertido en una tecnología consolidada para la producción de hidrógeno hasta el rango de megavatios (MW) y constituye la tecnología más consolidada a nivel comercial en el mundo.

La electrólisis AEL es la tecnología de electrólisis de agua más desarrollada y ya en la década de 1920 se habían construido varias plantas de MW en todo el mundo. La técnica es simple y duradera

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

y alcanza hasta 90.000 – 100.000 horas de funcionamiento, mientras que alcanza eficiencias comerciales de 60% - 75% y del 80% - 85% para sistemas a pequeña escala. Los electrolizadores alcalinos se caracterizan por su alta eficiencia y precio asequible. La pureza del hidrógeno obtenido por electrólisis con este tipo de equipos es muy alta, oscilando entre el 99,7% y el 99,9%.

Dado el excedente eléctrico presentado en las secciones anteriores, y los costos de instalación de los electrolizadores, la Tabla IV presenta el cronograma de instalación de y potencia de los electrolizadores.

Tabla IV. Esquema de instalación de electrolizadores.

Año	Potencia instalada [MW]	Energía Consumida por año [GWh]	Producción de Hidrógeno [t/año]
2.023	20	175	3.818
2.025	200	1.752	38.185
2.030	700	6.132	133.646
2.035	1.000	8.760	190.923

5. RESULTADOS - BENEFICIOS PARA LA ANDE POR LA VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Para los valores definidos en la Tabla IV, dados los MW de capacidad a ser instalados, teniendo en cuenta que el proceso de producción de Hidrógeno es un proceso electrointensivo, que demanda la utilización de gran cantidad de energía, durante las 24 horas del día, por ello, para este estudio se prevé un factor utilización de planta del 100% de la capacidad instalada. Es sabido que conforme se incrementan las horas de operación, el impacto del CAPEX sobre el coste de producción del hidrógeno disminuye, y el impacto del coste de la electricidad se incrementa.

Bajo esta premisa, y dado el Decreto N° 7551/2017 [9], se pueden inferir los beneficios a los cuales la ANDE estaría accediendo en caso de venta de energía. Por una cuestión de disponibilidad de la energía, se supone que estas plantas de hidrólisis estarán ubicadas en la Zona Este, próxima a la Central Hidroeléctrica Itaipu. Con esto, el costo de venta de energía queda definido en 60,75 USD/MWh para una instalación en 220 kV. El beneficio de la ANDE se daría por la diferencia entre el precio de venta y de compra de la energía, que en este caso sería el precio definido por Itaipu Binacional. Como el precio de la energía en este caso no se encuentra acordado, para fines prácticos de este trabajo se toma el mismo constante 22,60 USD/kW-mes. Como el precio de la tarifa se prevé que para el año 2023 se reduzca sustancialmente, el beneficio económico para la ANDE por la venta de energía eléctrica se vería incrementado.

Con esto, en la Tabla V se presentan los montos de facturación por la venta de energía a estas empresas de producción de Hidrógeno. Además, se presenta también el beneficio económico acumulado en los años de corte utilizados en este estudio (el horizonte de tiempo de estudio va hasta el año 2040).

Tabla V. Facturación y Beneficio Neto de la ANDE por venta de energía en la producción de Hidrógeno

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Año	Potencia Instalada [MW]	Energía consumida [GWh]	Facturación por venta de energía [U\$D/año]	Beneficio Neto para la ANDE [U\$D/año]
2.023	20	175.200	10.643.400	2.969.640
2.025	200	1.752.000	106.434.000	29.696.400
2.030	700	6.132.000	372.519.000	103.937.400
2.035	1.000	8.760.000	532.170.000	148.482.000
2.040	1.000	8.760.000	532.170.000	148.482.000
Total Beneficio acumulado al año 2040 [U\$D]				1.565.000.280

Como se puede observar, el beneficio total a ser obtenido por la ANDE en caso de venta de energía en las condiciones definidas por el Decreto 7551/2017 alcanza la suma de 1.565 Millones de dólares americanos. Los cuales significarían un incremento en la facturación, únicamente por la transacción de compra-venta de la energía dada en la zona este, para la utilización de la energía en la producción de hidrógeno verde. Con respecto a la disponibilidad de energía para cubrir los procesos de producción de hidrógeno, la Tabla VI presenta los valores finales de consumo y disponibilidad. Para ello se tienen en cuenta las centrales instaladas, la proyección de la demanda, el Plan Maestro de Generación como así también los valores de las plantas de electrólisis de producción de Hidrógeno propuesto en este trabajo.

Tabla VI. Disponibilidad energética para el año 2040.

Disponibilidad de producción de electricidad instalada, [GWh]	77.175,6
Plan Maestro de Generación ANDE [GWh].	9.745,2372
Proyección de la demanda [GWh]	24.611,64
Energía consumida en el proceso de electrólisis [GWh].	8.760
Disponibilidad de energía eléctrica para el SIN en el año 2040 [GWh]	53.549,20

Como se puede apreciar, según el escenario de prospectiva energética definido en [6], el SIN contaría con disponibilidad energética suficiente como para hacer frente a la instalación de una planta de producción de Hidrógeno de 1.000 MW de potencia. Sin embargo, dado el crecimiento vegetativo de la carga, y las predicciones de la ANDE, es probable que en ciertas horas e incluso meses de intenso calor, exista la necesidad de corte de carga.

6. CONCLUSIONES

Paraguay es un país donde la casi totalidad de la oferta interna de energía primaria es renovable, con alto porcentaje de fuente renovable y sostenible, la hidroenergía que se transforma en electricidad; y un notable porcentaje de participación de leña que enfrenta el desafío urgente y creciente de la sostenibilidad.

Sin embargo, en lo que respecta al uso de la energía, más de 40% del consumo final de energía se basa en combustibles fósiles importados (principalmente diésel y gasolinas) que se consumen especialmente en motores de combustión interna en el transporte, mientras que la incidencia de la electricidad en el consumo final es de poco más de 19%.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

El presente documento presenta un estudio sobre el potencial de producción de hidrógeno en Paraguay, con la finalidad de establecer un punto de partida para descarbonizar la economía, basándose en hidrógeno verde. Para ello se ha llevado a cabo un análisis general de aspectos técnicos de la tecnología alcalina AEL de producción de hidrógeno establecidas a nivel comercial.

El hidrógeno verde puede ayudar a lograr cero emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) en sectores que consumen mucha energía y son difíciles de descarbonizar, principalmente en procesos donde se consumen gran cantidad de derivados del petróleo, como el transporte de larga distancia, el transporte marítimo y la aviación. Desde las diversas perspectivas de evolución del sistema eléctrico nacional, pasando por el Plan Maestro de Generación de la ANDE, se encuentra que para el año 2040 el país estaría en condiciones de abastecer una planta de producción de Hidrógeno de 1.000 MW. El hecho de que la instalación se haga de manera gradual, permitirá ir adaptando las instalaciones requeridas para el abastecimiento de energía eléctrica.

Esta instalación, permitirá además lograr grandes beneficios económicos para la ANDE, logrando que la misma alcance para el año 2040 el valor de 1.565 Millones de dólares americanos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Blanco, R. Amarilla, A. Martinez, C. Llamosas and V. Oxilia. "Energy transitions and emerging economies: A multi-criteria analysis of policy options for hydropower surplus utilization in Paraguay", *Energy Policy*, 2017, pp. 312-321.
- [2] Heymo Ingeniería, Ariema Energía y Medioambiente. "Análisis de aspectos técnicos y económicos para el desarrollo de una economía de hidrógeno en Uruguay y Paraguay", Asunción, 2020, páginas 10 - 55.
- [3] Administración Nacional de Electricidad , "Compilación Estadística 2000 - 2020", Asunción, 2021, Páginas 4 - 17.
- [4] I. L. Sauer, J. F. Escobar, M. F. da Silva, C. G. Meza, C. Centurion, and J. Goldemberg, "Bolivia and Paraguay: a beacon for sustainable electric mobility?", *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2015.
- [5] Viceministerio de Minas y Energías, "Balance Energético Nacional 2020", 2021, página 3 - 12.
- [6] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) - Paraguay, "Prospectiva energética de la república del paraguay 2018 - 2050", Asunción, 2021.
- [7] Administración Nacional de Electricidad, "Plan Maestro de Generación 2021 - 2040", 2021, páginas 16 - 31.
- [8] IRENA, "Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolyser to meet the 1.5°C Climate Goal", Emiratos Árabes Unidos, 2020, páginas 30 - 99.
- [9] Decreto 7551/2017, "POR EL CUAL SE APRUEBAN LAS TARIFAS PARA EL SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA A LAS INDUSTRIAS ELECTROINTENSIVAS Y LA ESTRUCTURA TARIFARIA A SER APLICADA A LAS INDUSTRIAS ELECTROINTENSIVAS, 2017.