



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ENERGÍA HÍBRIDA PARA ÁREAS RURALES DISPERSAS DE LA PROVINCIA DE SANTIAGO DEL ESTERO (ARGENTINA) EN EL MARCO DE LOS ODS 2030 Y LAS MDBA

Hybrid energy for dispersed rural areas of the Province of Santiago del Estero (Argentina) in the framework of the SDG 2030 and the MDBA

FRANCO FERNÁNDEZ¹, ALEJANDRO FERREIRO², CARLOS JUÁREZ³, CARLOS CADENA⁴, LUIS MOYANO⁵

Recibido: 24 de diciembre de 2021. Aceptado: 17 de enero de 2022

DOI: <http://dx.doi.org/10.21017/rimci.2022.v9.n17.a109>

RESUMEN

La provisión de soluciones energéticas sostenibles en Áreas Rurales con Población Dispersa (ARPoDs) sin posibilidad de interconexión a las redes eléctricas de potencia en la Provincia de Santiago del Estero (Argentina), motiva a un análisis preliminar del contexto a nivel mundial, nacional y provincial, y luego a explorar opciones que integren diferentes fuentes de energía aplicadas a un caso de estudio, específicamente a la comunidad ubicada en la localidad de Las Viboritas, en el departamento Mitre de la provincia citada. El propósito del trabajo es exponer el análisis de la situación energética y posibles soluciones de aprovisionamiento de energía en el ámbito de las ARPDs desde una perspectiva integradora, a partir de los ODS 2030 y de la denominada Nueva Ruralidad. Además, se describe el estudio de una alternativa mediante sistemas energéticos híbridos solar-eólico, contrastada con otras opciones, incluso basadas en combustibles fósiles. Se aplica una herramienta computacional reconocida que, permite optimizar el funcionamiento de sistemas con fuentes de energía híbridas para cada hora del año. El diseño se realiza a partir de la cuantificación de la demanda, el dimensionamiento y costo de las tecnologías que conforman el sistema híbrido, y la disponibilidad de los recursos renovables en el sitio en estudio. Como resultado se propone un sistema híbrido solar-fósil con un banco de acumulación de litio, ya que este sistema presenta mayor fiabilidad y seguridad para su operación como red aislada.

Palabras clave. Sistemas Híbridos; ARPoDs; Solar-Eólico; Software; Factibilidad.

ABSTRACT

The provision of sustainable energy solutions in Rural Areas with Dispersed Population (ARPoDs) without the possibility of interconnection to power grids in the Province of Santiago del Estero (Argentina), motivates a preliminary analysis of the context at the global, national and provincial levels, and then to explore options that integrate different energy sources applied to a case study, specifically to the community located in the town of Las Viboritas, in the Mitre department of the aforesaid province. The purpose of the work is to present the analysis of the energy situation and possible energy supply solutions in the field of ARPDs from an integrative perspective, based on the 2030

- 1 Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE). Correo electrónico: ffernandez@unse.edu.ar
- 2 Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4072-9774>. Correo electrónico: ferreiro@unse.edu.ar
- 3 Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1948-5293>. Correo electrónico: cjuarez@unse.edu.ar
- 4 Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Correo electrónico: cadenacinenco@gmail.com
- 5 Instituto de Investigación y Proyectos de Economía Social y Solidaria, INPESS. Facultad de Humanidades, Ciencias Sociales y de la Salud, UNSE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4830-3436>. Correo electrónico: moyanol4200@gmail.com

ODS and the so-called New Rurality. In addition, the study of an alternative using solar-wind hybrid energy systems is described, contrasted with other options, even based on fossil fuels. A recognized computational tool is applied that allows optimizing the operation of systems with hybrid energy sources for each hour of the year. The design is carried out from the quantification of the demand, the dimensioning and cost of the technologies that make up the hybrid system, and the availability of renewable resources at the site under study. As a result, a solar-fossil hybrid system with a lithium accumulation bank is proposed, since this system presents greater reliability and safety for its operation as an isolated network.

Keywords. Hybrid Systems; ARPoDs; Solar-Wind; Software; Feasibility.

I. INTRODUCCIÓN

LA DISPONIBILIDAD de energía es un requisito esencial para la vida y para favorecer el desarrollo. En consecuencia, es un ingrediente valioso para atenuar o eventualmente reparar dificultades emergentes de la escasez y de la indigencia. En este orden, la energía es fundamental para, disponer agua de calidad y en volumen necesario, ejecutar actividades productivas, poseer adecuados servicios en salud y educación, iluminar vías de circulación peatonal y vehicular, etc. Estas premisas, enmarcadas en la sostenibilidad energética, pueden sintetizarse como paradigma en las relaciones sintetizadas en el trilema energético propuesto por el Consejo Mundial de Energía[1][2] que vincula Seguridad Energética, Equidad Social, y Reducción de Impacto Ambiental (Fig. 1), esto es Disponibilidad, Equidad y Ambientalidad en materia de Energía. Es decir, los sistemas energéticos tienen relevancia por su correlación con las múltiples dimensiones del desarrollo sostenible, lo que involucra además la reducción de emisiones de gases nocivos que tiendan a atenuar el cambio climático. Actualmente en el mundo, en Argentina y en la Provincia de Santiago del Estero existen comunidades rurales con demandas energéticas difíciles de satisfacer por causas diversas, entre las que se resalta como probables su localización distante de las redes de energía, su baja densidad poblacional, su reducida o nula actividad productiva. La provisión de energía a estas comunidades en la extensa geografía provincial constituye un problema, que a su vez obstaculiza la potencialidad de plasmar alternativas de Desarrollo Humano (DH) para sus habitantes.

En sentido similar, se interpreta que las afirmaciones y conclusiones precedentes confluyen en los Objetivos de Desarrollo Sostenible - ODS[3], cuyo antecedente son los Objetivos de Desarrollo del Milenio[4], ambos de Naciones Unidas. Pese a la

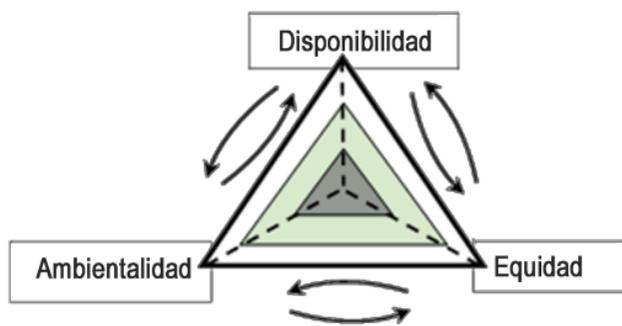


Fig. 1. Trilema energético[1].

relevancia de la energía, aún subsisten sectores de población bajo condiciones de privación de ella, lo que es más notorio en Áreas Rurales con Población Dispersa (ARPoD). Se plantearon 17 ODS y 169 metas asociadas a los distintos objetivos, en los que, con un horizonte a largo plazo, se consideran tópicos interrelacionados entre sí del DH Sostenible, de los cuales a título ilustrativo se mencionan pobreza, desigualdad, clima, crecimiento económico, inclusión social, paz y justicia, protección y degradación del medio ambiente. Examinar datos en base a los ODS contribuye a la evaluación, análisis y formulación de instrumentos tendientes al logro de superaciones en materia de DH, tanto a nivel local, regional, nacional, ... Es esencial tener presente la naturaleza sistémica de estos Objetivos, interpretando cabalmente su integridad, como también la de sus metas. Entonces, por las imbricaciones entre ODS, se pueden alcanzar simultáneamente adelantos en unas metas y originarse consecuencias negativas en otras. No obstante, según sugiere Alers[5] en relación con expectativas de DH vinculadas con la energía, se entiende que las mismas pueden considerarse en estrecha relación con los ODS 3, 7, 10 y 11, aunque con vínculos más débiles con otros objetivos como se representa en Fig. 2[6].

Santiago del Estero es una provincia que registra la primera fundación de una ciudad actual en



Fig. 2. ODS y Escenarios de DH y Energía.

Argentina. Es una de las jurisdicciones más extensas del país, ya que posee una superficie de 136.351 km², con una densidad de población de 6,4 hab/km². La provincia es la que registra mayor población rural total y dispersa, que supera notablemente los valores medios nacionales como se indica en la Tabla I[7].

Tabla I. Datos de población de Argentina y de Santiago del Estero

Jurisdicción	Densidad, hab/km ²	% Población rural	
		Total	Dispersa
Rep. Argentina	10,7	9%	5,70%
Santiago del Estero	6,4	31,3%	23,10%

A los fines de configurar el contexto, esta provincia se encuentra dividida en 27 departamentos, conforme la geografía que sintetiza el mapa de la Fig. 3.

Esta provincia se ha sumado a la Agenda 2030 de la ONU, a través de los ODS, proponiendo en 2020, al conmemorarse doscientos años de su organización soberana, las Metas del Bicentenario de la Autonomía (MDBA). Estas metas, constituyen un horizonte de superación, pues combinan obras estratégicas con programas de las áreas de gobierno tendientes a producir mejoras en educación, alimentación, productividad económica, generación de riqueza, accesibilidad a servicios e infraestructura de comunicación, conectividad, y todo aquello que contribuya para que cada santiagueño pueda desarrollarse según su proyecto de vida.



Fig. 3. Mapa Prov. Santiago del Estero.

Las MDBA, se consideran una instancia pragmática, tendiente a afianzar el desarrollo integral de Santiago del Estero, siendo sus ejes transversales:

- Desarrollo Sostenible,
- Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.
- Digitalización y Modernización Administrativa.

Se entiende a los ODS como un marco consistente en el que están basadas las MDBA, siendo que estas últimas se interpretan fines, con expectativas de una mejor apropiación y cumplimiento de esos objetivos en el ámbito provincial. En la Tabla II se detallan las MDBA.

Por lo expresado, a partir de los fundamentos lógicos de las MDBA, es posible vincular a estas con el devenir de los distintos procesos de estudio y exploración llevados a cabo por este equipo en los últimos años. El enfoque respecto de la aplicación de las energías renovables se ha orientado hacia opciones tendientes a la solución para familias rurales definidas como integradas a comunidades de agricultura, campesinas o indígenas.

Tabla II. MDBA de Santiago del Estero.

Núm.	MDBA
1	Promover el crecimiento económico sostenido, incrementando la incidencia del Producto Bruto (PB) provincial en el PBI nacional.
2	Ampliar la cobertura hídrica en el territorio provincial y mejorar la eficiencia en el uso del agua.
3	Cobertura universal de salud.
4	Incluir en los planes educativos actividades orientadas a las líneas de desarrollo provincial.
5	Mejoramiento de la gestión de recursos y gastos, basados en resultados.
6	Ordenamiento territorial urbano y rural.
7	Aumentar la generación propia de energía con fuentes renovables (ER).

Dando por sentado que los objetivos de estos sectores de la población rural, se encuadran dentro de un marco general para toda América Latina, a través de los cuales se persiguen intenciones vinculadas hacia mejoras en la calidad de vida en lo energético en particular, pero también hacia la mejor calidad de vida en general, los que pueden sintetizarse en los criterios sintetizados en la Fig. 4, es decir:

- Infraestructura (educativa, sanitaria, comunicaciones y conectividad, de transporte).
- Productividad y Competitividad agroindustrial.
- Dinámica Rural (y Urbana).
- Acceso Equitativo.
- Turismo Rural No Agrícola.
- Servicio Ecosistémico (paisaje, biodiversidad).
- Trabajo ilegal y Migración.
- Explotación Sustentable, Eficiencia de Recursos.
- Mitigación y Adaptación a Cambio Climático (CC).
- Financiación y Cooperación.
- Pobreza y Ruralidad.
- Seguridad Alimentaria.
- Igualdad de Género.

De los párrafos precedentes, se advierte que el concepto de ruralidad ha evolucionado, ya no se lo concibe exclusivamente ligado a una situación



Fig. 4. Criterios de Nueva Ruralidad en Argentina.

geográfica o demográfica dado que su caracterización puede ser insuficiente, pudiendo desdibujar la realidad.

En este sentido, Dirven afirma que "...frente a los ODS, y con la convicción de que las áreas rurales y su población juegan un papel primordial en su logro, se replantea el cómo se debiera medir lo rural..."[8]. En este sentido, se interpreta que, en la población rural, son actores claves las familias dedicadas a la agricultura familiar, como así las campesinas e indígenas. Este autor además sugiere "...enfaticar lo territorial dado que los ODS se orientan tanto a indicadores socioeconómicos como ambientales, y los territorios rurales suelen ocupar más del 90% de la superficie de los países".

Por lo expresado, se considera oportuno adherir a la evolución conceptual de "lo rural", implicando en la expresión a un territorio que abarca la totalidad o la mayor parte de la superficie del área considerada, sus riquezas con particular énfasis en recursos naturales renovables, como así la posibilidad de asumir aportes como opciones de superación a problemas ambientales.

Lo sintetizado precedentemente, en gran medida también se registra en el documento publicado por la FAO[9], en el que a partir del aporte realizado por organismos referentes en desarrollo rural se han elaborado criterios para la definición de la ruralidad en la Argentina que permitan trabajar de un modo más integral en el sector.

Schein et al. además afirman la gran relevancia de la ruralidad en el desarrollo, en el crecimiento cualitativo y en la prosperidad de las sociedades latinoamericanas[9]. En tal orden, es oportuno transcribir una cita de la FAO, la cual señala que "...de las 169 metas de los ODS, 132 (un 78%) mantienen una fuerte relación con el mundo rural"[10], entre las cuales se tienen las metas correspondientes a la energía que se exponen en Tabla III. A partir de ello, es apropiado citar a Penagos et al., que establecen que "la Agenda 2030 debe reconocer que los espacios rurales son determinantes en el logro de sus metas y que las políticas públicas y los arreglos institucionales asociados deben considerar la complejidad de lo rural para poderlas cumplir"[11].

Tabla III. Metas para ODS 7
"Energía Asequible y No Contaminante"

Núm.	Metas
7.1	Garantizar acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.
7.2	Aumentar la proporción de ER en el conjunto de fuentes primarias.
7.3	Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética
7. a	Aumentar cooperación internacional para acceso a investigación y tecnología en energía limpia, incluidas ER, eficiencia energética y tecnologías avanzadas y menos contaminantes de fuentes fósiles. Promover inversión en la materia.
7. b	Ampliar infraestructura y mejorar tecnología para servicios energéticos modernos y sostenibles, incluidos los países en desarrollo, en particular aquellos menos adelantados y pequeños.

Por lo expresado, dado el carácter esencial de la energía en el marco de la ODS y de las MDBA, se interpreta la destacada relevancia de considerar soluciones en ámbitos rurales, en especial en aquellos que pueden encuadrarse como ARPoDs. Pese a las características de estas áreas rurales, es habitual que en ellas se disponga de pequeñas edificaciones comunitarias para materializar atenciones en educación, salud, seguridad y otros fines. La existencia de un restringido número de habitantes, como así de los edificios comunitarios citados, hacen necesario analizar y proponer

alternativas de sistemas de suministro de energía eléctrica (EE) a partir de ER.

La situación descripta motiva el análisis de prefactibilidad de aplicación de sistemas energéticos híbridos en ARPoDs, basados en energías limpias renovables y alguna convencional de apoyo. En este trabajo, se considera el diseño y análisis de configuraciones de sistemas energéticos, entre las cuales se incluye la producción de electricidad mediante el uso combinado de un generador Diesel convencional y subsistemas híbridos solar-eólico, incluyendo el almacenamiento en un banco de baterías de litio, de excesos de EE producida por las fuentes mencionadas.

La herramienta utilizada para el análisis y diseño del sistema es un programa específico reconocido, el que optimiza el funcionamiento de los micro- sistemas híbridos para cada hora del año, utilizando datos de equipos seleccionados por el proyectista y considerando variables de recursos renovables (como radiación solar, valores y distribución de velocidades de viento). El programa determina si el sistema cumple con las demandas requeridas y calcula los costos del ciclo de vida del proyecto, incorporando diferentes elementos adecuados para el aprovechamiento de EERR y convencionales.

En primera instancia, se sitúa la problemática planteada en el contexto mundial, luego a nivel de las provincias que integran la República Argentina y a continuación para los departamentos que conforman la Provincia de Santiago del Estero. Posteriormente se expone la metodología aplicada, se realiza la caracterización de la demanda y de los recursos, se formula el análisis de los costos y componentes, presentándose además la simulación realizada y sus resultados. Por último, se exponen conclusiones de relieve.

II. CONTEXTOS MUNDIAL, NACIONAL Y PROVINCIAL

A nivel mundial, en base a datos para las naciones del orbe de consumos anuales de Energía Eléctrica por Habitante, EEpc- expresados en kWh/habitante,[12];[13] y[14], se tiene la Fig. 5. De la misma se infiere que la República Argentina, a nivel general con relación a este índice, se posiciona

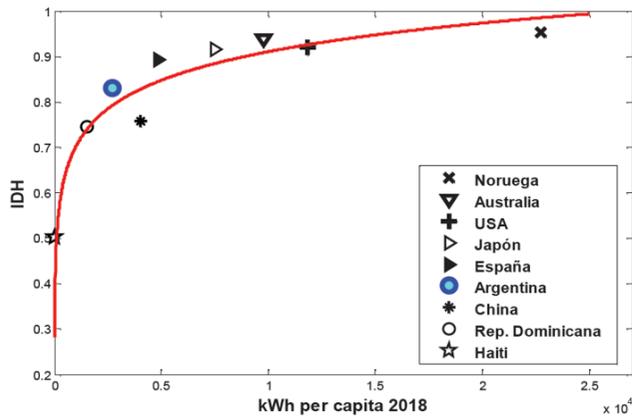


Fig. 5. EEpc vs. IDH (nivel global) 2018.

entre las naciones con categoría de Muy Alto IDH. Se destaca que el IDH es elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo[15][16] con rangos de valores extremos: Muy Alto (0,79); y Bajo (0,51), el cual evalúa los avances de un país en dimensiones parciales representativas de: salud (esperanza de vida al nacer); educación (años de escolaridad); y nivel de vida (ingreso bruto per cápita). En esta gráfica, también se muestra la curva propuesta por Pasternak [17] que relaciona las citadas variables mediante la ecuación (1), apropiada para su aplicación en ámbitos con poblaciones de más de un millón de habitantes. También, se entiende que esta ecuación puede emplearse a poblaciones menores teniendo en cuenta que el ajuste puede no ser óptimo, en especial se interpreta útil para análisis comparativos. En la Fig. 3 se advierte nuevamente la proximidad de los resultados relevados para los países considerados con los valores esperados según la curva obtenida mediante la ecuación de Pasternak.

$$IDH=0,091 * \ln (EEpc) + 0,0724 \quad (1)$$

Lo expresado se infiere que en general, el IDH en Argentina es muy alto. Sin embargo, si se compara este resultado con algunas realidades visibles en diversos lugares del país, se advierten notorias desigualdades en las dimensiones que integran el IDH, las que dan cuenta de los diferentes contextos existentes. Por ello, se considera como premisa de este trabajo que Argentina es un país con un grado de urbanización tal que los índices de desarrollo, considerados como

medias nacionales, enmascaran realidades muy disímiles a nivel periurbano y rural. En este sentido, en algunas provincias el desarrollo rural está condicionado a la disponibilidad energética y esta se encuentra limitada por razones geográficas, técnicas y económicas. Por ello, se abordó el análisis de los requerimientos energéticos provinciales.

Para contextualizar las realidades provinciales se presenta la Fig. 6, que muestra resultados de IDH para cada jurisdicción en 2011, 2013, 2015 y 2016. Los datos graficados, basados en registros de la Secretaría de Energía de la Nación - SEN - (2011, 2013, 2015, 2016) y del Instituto Nacional de Estadística y Censos[18], se han determinado con la ecuación (1). En la gráfica se advierte que los índices para la mayor parte de las provincias argentinas reflejan de modo próximo sus correspondientes realidades, confirmando que la mayoría de aquellas con valores de IDH más reducidos se localizan en el norte del país, y entre las primeras está Santiago del Estero, a cuyo ámbito se orienta este trabajo.

Se destaca que en esta provincia el recurso solar es muy abundante y existen en ella regiones donde sus habitantes carecen de EE y otros servicios esenciales. Para ratificar su posicionamiento frente a las demás provincias se aplicó un indicador ad-hoc (Índice de Requerimientos Energéticos Dispersos, IRED), cuyos resultados se comparan en Fig. 7 con los de IDH determinados para 2015 según procedimiento detallado arriba. Este indicador resulta de considerar la incidencia proporcional en cada jurisdicción de desocupación del suelo, tipo de viviendas (considerando construc-

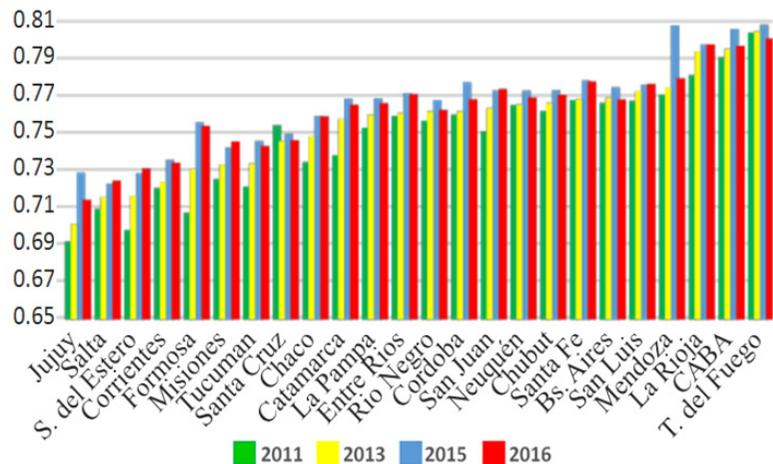


Fig. 6. IDH por provincia argentina 2011-2016.

ciones precarias habituales en ARPoDs), uso de leña y consumo de gas envasado. La gráfica de IRED evidencia variaciones más notables, siendo que ellas muestran acuerdo con los valores de IDH y las realidades de cada jurisdicción.

Respecto a los Departamentos de Santiago del Estero, la Fig. 8 sintetiza la evolución del IDH en ellos para los años citados, en base a datos también logrados con la ecuación (1) mediante registros de SEN (2011, 2013, 2015, 2016) e INDEC[18]. De nuevo, se entiende a estos resultados representativos de las realidades de cada territorio. Si bien se advierten ciertas variaciones en cada uno de los departamentos, algunas de ellas más acentuadas, las que pueden originarse en cambios locales. Se concluye que presentan mayores necesidades en cuanto a DH los departamentos San Martín, Figueroa, Mitre y Salavina, pues los valores del índice son los más reducidos.

A nivel provincial, las acciones gubernamentales tendientes a incorporar instalaciones que funcionen con EERR se implementaron a través del Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales[19] que se iniciaron con un estudio de mercado efectuado por la Secretaría de Energía de la Nación en 1999. Luego, en el 2001 se firmó el Convenio del gobierno provincial con organismos nacionales, por el cual se determina la participación en el proyecto[20]. A partir del convenio se plasmaron instalaciones fotovoltaicas (FV) autónomas en escuelas rurales en toda la gran extensión de la provincia, concretándose 690 de este tipo con una potencia total instalada de 397 kW hasta el año 2016[19]. Conforme datos disponibles, a fines de 2019 no se tenía previsto ejecutar nuevas instalaciones en el ámbito provincial a través de este proyecto.

III. METODOLOGÍA

El procedimiento aplicado en el diseño contempla inicialmente el análisis de la demanda de energía a cubrir, como magnitud esencial a satisfacer. El examen de alternativas de conversión de energía se concreta mediante un software que se considera

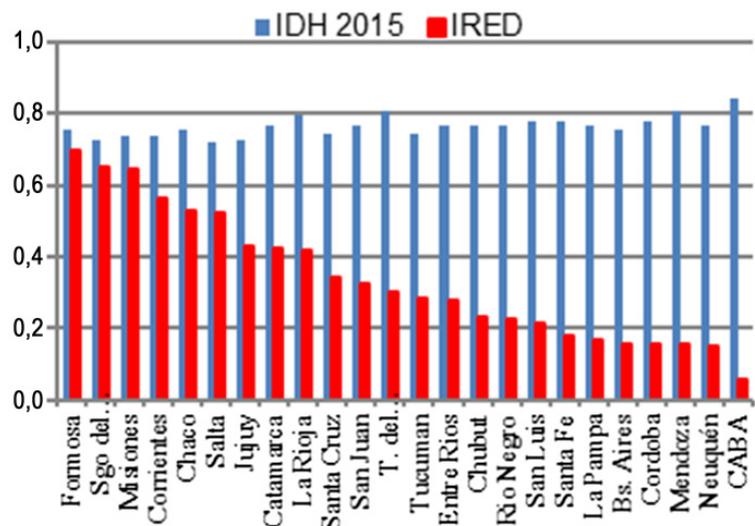


Fig. 7. IRED para provincias argentinas.

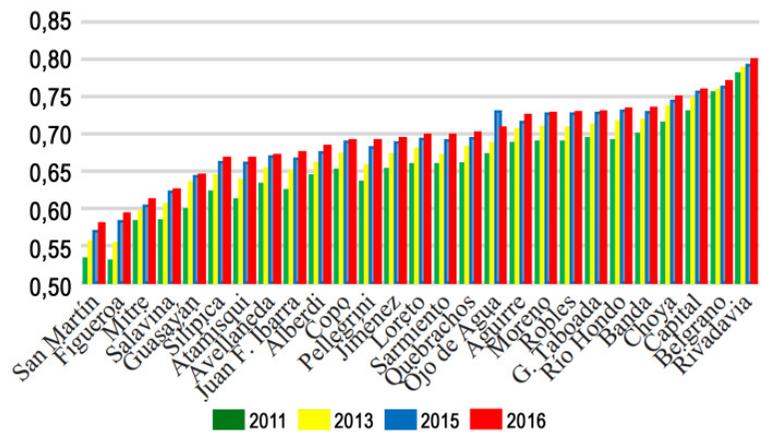


Fig. 8. IDH para Departamentos de Santiago del Estero.

referente para optimizar el diseño desde micro redes energéticas rurales hasta redes de mayor envergadura e incluso conectadas a sistemas eléctricos de potencia. El mismo modela y optimiza sistemas híbridos de provisión energética, tratando de propiciar soluciones que equilibren ingeniería y economía.

El programa realiza tres tareas principales: simulación, optimización y análisis de sensibilidad. En el proceso de simulación, el software modela el rendimiento de una determinada configuración del sistema de generación distribuida, para cada hora del año, con el objetivo de determinar su viabilidad técnica y costo del ciclo de vida. En el proceso de optimización, el software simula diferentes configuraciones del sistema en busca de aquellas que satisfagan las restricciones técnicas con el menor costo de ciclo de vida. Además, en el proceso de

análisis de sensibilidad, realiza varias optimizaciones en una serie de supuestos acerca de las variables de entrada, para medir los efectos de la incertidumbre o cambios en los datos ingresados al modelo. El proceso de optimización determina el valor ideal de las variables sobre las que el proyectista tiene el control, tales como la naturaleza de los componentes que conforman el sistema, o el tamaño o cantidad de cada uno. El análisis de sensibilidad ayuda a evaluar los efectos de las incertidumbres en variables como la velocidad del viento, o la evolución de los precios del combustible.

IV. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA Y RECURSOS

A los fines de materializar un estudio en una ARPoD se considera específicamente la aplicación del procedimiento a una comunidad rural aislada, emplazada en uno de los Departamentos de Santiago del Estero con mayores necesidades de DH. A tal fin, se ha seleccionado la localidad “Las Viboritas”, ubicada en el Departamento Mitre, en el sureste de la provincia, con coordenadas geográficas: S 29,65° y W 62,62. La imagen satelital del área bajo estudio, tomada de Google Earth, se muestra en la Fig. 9. La comunidad está constituida por 12 viviendas alrededor de una escuela. Se considera una pequeña instalación de alumbrado público en el entorno del establecimiento educativo. Esto requiere considerar en el estudio un perfil de carga de 24 horas.

La Tabla IV muestra la cuantificación de la demanda de potencia para la comunidad en estudio, en base a una estimación de las diferentes cargas o consumos que podría tener una vivienda rural típica, contemplando las recomendaciones del Plan Nacional de Uso Racional y Eficiente de Energía con el uso de lámparas LED.

Para la obtención del perfil de carga de la comunidad (Fig. 10), se aplica la curva de carga en porcentaje para un servicio de 24 horas, establecida por el programa para toda la comunidad, sobre la demanda total cuantificada en la tabla anterior.

Los recursos renovables como la radiación y la velocidad del viento fueron tomados del sitio web

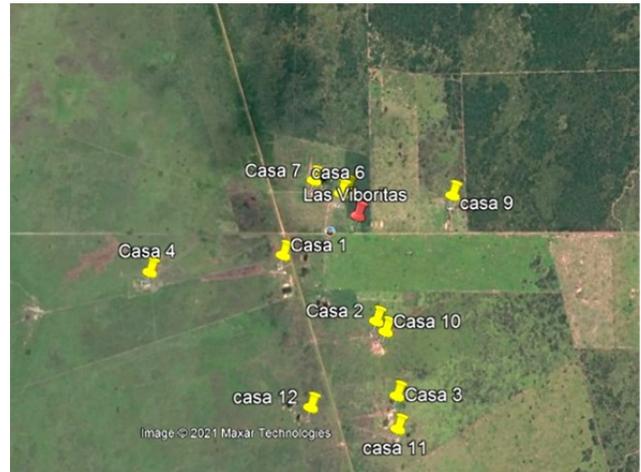


Fig. 9. Imagen satelital del área de estudio.

Tabla IV. Cuantificación de Potencia Instalada (PI).

Cargas/Equipos	Unitaria [W]	Núm.	PI [kW]
Lámpara LED	9	5	0,05
Radio-Eq. Audio	30	1	0,03
TV LED	100	1	0,10
Refrigerator	140	1	0,14
Ventilador	70	2	0,14
Cargador celular	10	3	0,03
Otros	200	1	0,20
Estimada por vivienda			0,69
12 Viviendas			8,28
Alumbrado público	30	10	0,30
Demanda total			8,58

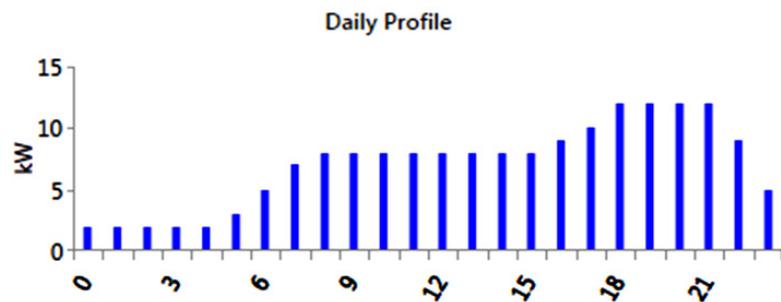


Fig. 10. Perfil diario de demanda comunitaria.

de la NASA[21]. La Fig. 11 muestra el perfil de radiación solar global promedio mensual en un plano horizontal, los valores son un promedio entre los periodos 1983 y 2005 (22 años).

La Fig. 12 muestra el perfil de velocidad del viento (promedio mensual) para el sitio de estudio, los valores resultantes de un relevamiento correspondiente al periodo de 30 años 1984-2013.

V. COSTOS Y COMPONENTES

La Tabla V muestra los costos unitarios en dólares americanos (\$) de los componentes utilizados en las propuestas esquemáticas que se analizan para un sistema aislado de la red eléctrica como el que se considera. Los precios se tomaron del mercado argentino al dólar oficial.

Se consideró en el análisis, diferentes configuraciones de sistemas, en la Tabla III se muestran en el orden de Menor Costo por Unidad de Energía (CoE).

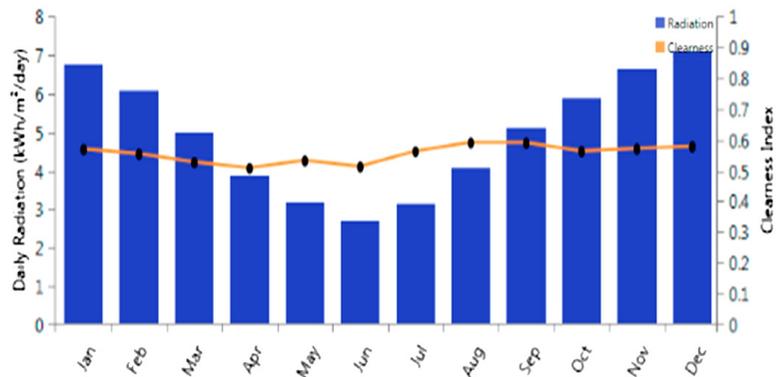


Fig. 11. Perfil de radiación solar mensual.



Fig. 12. Velocidad de viento media mensual.

Tabla V. Costos de componentes.

Componente	Costo de:			Ciclo Vida
	Capital (Cc), u\$ kW	Reemplazo, % (Cc)	Oper. y Mant.	
Grupo Electrónico GE	200	100	0,06 u\$ / op hs	15 khs
Panel FV (PF)	800	50	6 \$ / año	25 años
Aerogenerador (Eol)	6000	80	420 \$ / año	20 años
Convertidor (Cnv)	264	100	0	15 años
Batería LFP (BLF)	678	75	0	15 años

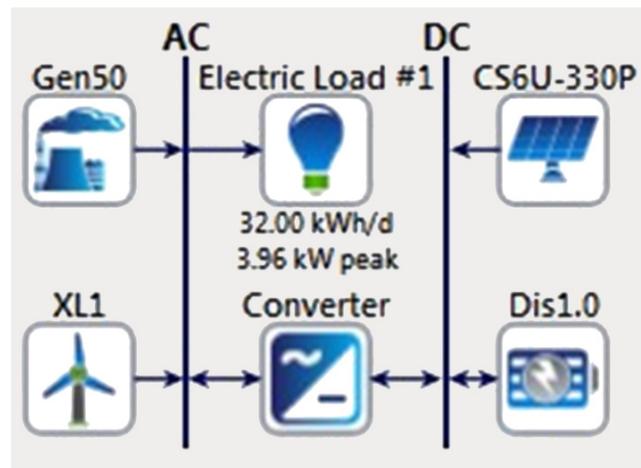


Fig. 13. Esquema general del sistema estudiado.

La Fig. 13 muestra el esquema inicial del sistema energético híbrido analizado en este caso de estudio, el que incluye un arreglo Fotovoltaico (FV), un aerogenerador (Eol), GE (Grupo Electrónico), Cnv (Convertidor) y BLF (Batería de Litio-Ferrosulfato).

Resulta oportuno además examinar la evolución de la economía de los componentes de siste-

mas de EERR. A tal fin se considera algunos elementos de estos sistemas, que por costo o importancia permiten delinear algunas conclusiones interesantes al respecto. La tecnología solar, en especial la Fotovoltaica (FV) ha registrado un crecimiento vertiginoso a nivel mundial debido al impulso promovido por países desarrollados y subdesarrollados en la construcción de grandes parques FV (lo que se denomina esquema de

generación centralizada), como así mediante programas de instalación de paneles solares en techos de edificios privados y públicos (viviendas, organismos públicos, industrias, etc.) para el autoconsumo (conocido como generación distribuida). A través de la producción industrial de estos paneles, se produjo un notable descenso de sus precios durante la última década, pasando de los 76 U\$S/Wp en 1970 a unos 0,30 U\$S/Wp en 2015, esto se conoce como efecto Swanson (Fig. 14). La Ley de Swanson observa que los precios de los paneles FV caen un 20% cada vez que la producción mundial duplica sus ventas. Actualmente esto causa que el precio se reduzca un 75% cada 10 años, impactando en mayor accesibilidad y penetración de los paneles solares en el mercado tanto urbano como rural.

Por otro lado, la tecnología de los acumuladores de litio, que es totalmente complementaria al uso de paneles FV también está en pleno crecimiento, producto principalmente de la movilidad eléctrica (vehículos eléctricos), y a los sistemas FV conectados a red con almacenamiento. El precio del kilovatio hora[kWh] de las baterías de litio está bajando continuamente, en la actualidad ya está en 100 U\$S/kWh en contraste con los 60 U\$S/

kWh de las de plomo ácido, siendo este importe fijo, mientras que el de las de litio continúa disminuyendo. Los acumuladores de litio presentan numerosas ventajas en relación a los de plomo: tienen mayor voltaje por celda y densidad energética, son más compactas, ligeras y con mayor vida útil.

Actualmente ambas tecnologías, la fotovoltaica y de litio están atravesando una crisis en la cadena de suministro de materia prima debido a la pandemia COVID-10 y a factores geopolíticos. Esto hace que haya escases y una subida de precio, pero se espera que sean transitorio.

Por otra parte, es relevante mencionar que los sistemas híbridos son una solución de compromiso en la actual transición energética, pues permiten disminuir notablemente las emisiones de CO2 y a su vez garantizar la seguridad energética de los sistemas de generación de energía. La seguridad energética no es un factor menor, por lo contrario, es muy importante en los sistemas de energía porque garantiza la estabilidad tanto técnica como económica, y permite el desarrollo normal de las actividades económicas de cualquier país o región y sobre todo evita que los precios

de la energía eléctrica se disparan como actualmente está ocurriendo en países de Unión Europea. A escala generación centralizada el mixer de fuentes de energéticas que mejor representaría los dos factores anteriores sería la combinación de energía nuclear, hidroeléctrica, solar y eólica. Mediante el uso de estas fuentes se obtiene un sistema híbrido limpio y fiable, lo cual impacta favorablemente la dimensión social. Cabe resaltar que la energía nuclear no es una energía renovable, pero si es limpia debido a que no emite CO2, su principal inconveniente son los residuos radiactivos que tardan alrededor de mil años en degradarse, pero también es oportuno indicar que ya hay soluciones a este último problema.

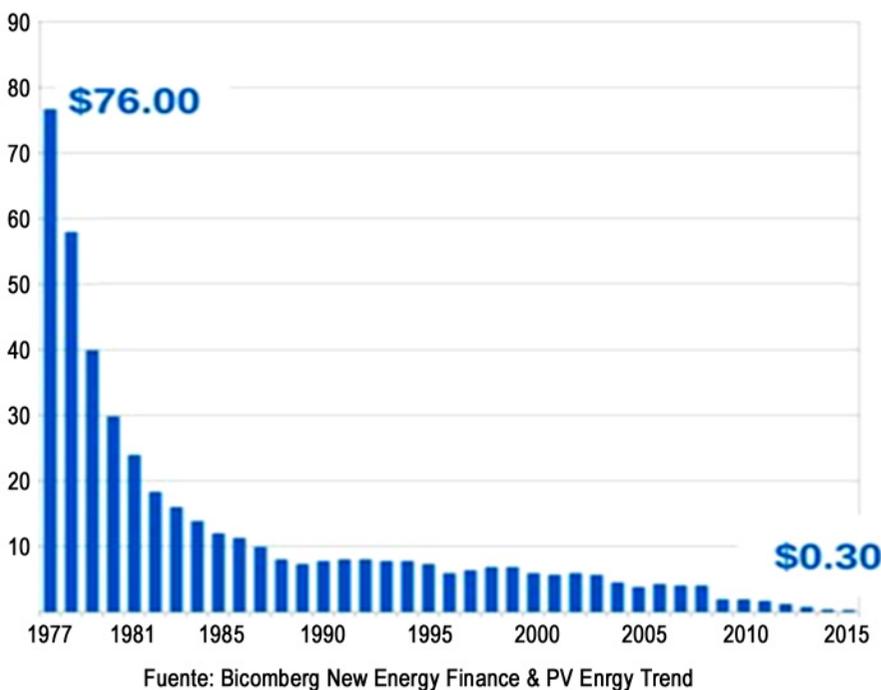


Fig. 14. Efecto Swanson: evolución del precio de paneles FV (US\$/Wp).

XVI. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Mediante la herramienta computacional aplicada se plantearon diferentes configuraciones de sistemas energéticos, compatibles con la satisfacción de la demanda de la comunidad considerada.

Se analizaron varias alternativas posibles que contemplan distintas categorías: esquemas con recursos primarios renovables puros (eólica y solar), y otros híbridos que combinan los anteriores y un generador a base de combustible fósil como respaldo. En estos esquemas de generación distribuida, considerados como aquellos que producen cerca o en los mismos puntos de consumo, es necesario su complementación con un banco de almacenamiento de energía para acumular los excedentes de energía eólica y/o solar. Se consideró para esto, un esquema de baterías de Litio-ferro-fosfato (LFP) modular de una capacidad suficiente para abastecer las cargas nocturnas del sistema. Como los acumuladores entregan energía en corriente continua y las cargas son de corriente alterna se requiere un convertidor DC/AC bidireccional, también conocido como inversor.

Las salidas del programa que se consideraron relevantes para el análisis son: Capital Inicial[S], Costo Presente Neto del Proyecto[NPC en S], Costo por Unidad de Energía[CoE en S/kWh], Fracción Renovable Utilizada[% RV], Excedente de Energía[% EX] y las emisiones de CO₂ en[kg/año]. De las configuraciones mencionadas se seleccionaron las de menor CoE, correspondientes a cada categoría analizada, y un total de 8 configuraciones de sistemas que se sintetizan en Tabla VI, en la que se indica entre otros la potencia por fuente y el Costo Inicial (CI).

La valoración para seleccionar el sistema más apto destinado a una aplicación particular requiere de un análisis detallado de los principales parámetros financieros, técnicos y ambientales, como los que se muestran en la Tabla VI. Por tanto, se debe adoptar un criterio de ponderación de los valores que toman estos indicadores. En el orden financiero, el NPC es un indicador importante para la valoración de activos fijos. En este sentido, la alternativa que maximiza el NPC normalmente es la mejor u óptima. Sin embargo, este criterio no considera los factores técnicos y ambientales que, en alguna alternativa, aunque podrían involucrar

un NPC menor, resulte más estratégica o conveniente. El NPC toma en cuenta todos los costos e ingresos que tienen lugar durante el tiempo de vida del proyecto, expresándolos en valores actuales mediante la tasa de descuento que se establece en el proceso de diseño. En el NPC se incluyen los costos de: montaje inicial, reemplazos de componentes, de mantenimiento, de combustible, compra de energía a una red. Eventualmente, el NPC puede incluir costos por penalizaciones a la emisión de gases de efecto invernadero. Los ingresos incluyen los valores residuales de los diferentes componentes del sistema al finalizar su vida útil, así como las retribuciones provenientes de la venta de energía a la red.

La Tabla VI muestra el resultado del proceso de simulación y optimización económica (basado en el NPC). Como se puede observar, el sistema optimizado atendiendo el valor de su NPC, es un esquema híbrido (fila 1, Tabla VI) constituido por un arreglo FV de 11.2 kW, un generador Diesel de 50 kW, un convertidor de 8.46 kW y un banco de acumulación de 22 baterías de LFP (24V/2.4kWh), que suministra EE a una red aislada. Esta configuración presenta los mejores indicadores financieros comparados con los restantes esquemas, con un costo de energía de 0,411 \$/kWh, un capital inicial de \$ 36.116, un significativo aporte de renovables, con un notorio excedente de electricidad y una emisión relativamente baja. En contraposición, se tiene el esquema híbrido, pero sin almacenamiento de energía (fila 8 en Tabla VI), constituido por un arreglo FV solar de 35.2 kW, un aerogenerador de 9 kW, un generador Diesel de 50 kW y un convertidor 2.9 kW. En este caso se puede observar que el CoE y el NPC están ambos entre 2 y 7 veces por encima de los demás esquemas, y posee un excedente de electricidad y de emisiones considerablemente alto. Por otra parte, los dos esquemas renovables puros (filas 3 y 4) poseen una fracción renovable del 100% y cero emisiones de CO₂, pero tienen un excedente de electricidad anual alto (entre 70-80%) y un costo de energía (CoE) superior al sistema optimizado.

Por otra parte, se indagó el efecto que tendría una tasa de desabastecimiento distinta de cero en la configuración y tamaño del sistema. La Tabla VII muestra un *análisis de sensibilidad* para una tasa de desabastecimiento de 0% y 10%, donde el primero caso es el esquema híbrido

Tabla VI. Principales configuraciones de sistemas en el orden de menor CoE

Núm.	Esquema del Sistema	FV kW	Eol, kW	GE, kW	Cnv, kW	BLF (#)	CI, 103 \$	NPC, 103 \$	CoE, \$/kWh	% RV	% Ex	CO ₂ , Kg/año
1	FV-GE-Battery-Converter	11,2	-	50	8,46	22	36	32	0,41	87	35,4	1630
2	FV-Eol-GE-Battery-Converter	9,62	1	50	9,2	20	39	56,5	0,45	92	37	941
3	FV-Battery-Converter	39,5	-	-	4,25	26	50	66,5	0,52	100	80	0
4	FV-Eol-Battery-Converter	26,4	1	-	4	36	52	74,3	0,59	100	73	0
5	EOL-GE-Battery-Converter	-	3	50	10,7	18	43	83,3	0,66	65,2	11,4	4307
6	GE-Battery-Converter	-	-	50	10,9	18	25	100,8	0,8	0	0,83	14.220
7	Eolic-Battery-Converter	-	7	-	4,83	104	113	181,8	1,44	100	47,5	0
8	FV-Eol-GE-Converter	35,2	9	50	2,95	-	92	364,1	2,88	0	90,8	43,934

Tabla VII. Análisis de sensibilidad de tasa de desabastecimiento.

T.D (%)	Sistemas de energía	FV kW	Eol, kW	GE, kW	Cnv, kW	BLF (#)	Capital Inicial, \$	NPC, \$	CoE, \$/kWh	Frac. Renov,	CO ₂ , Kg/año
0	Solar-GE- Battery Converter	11,2	-	50,0	8,46	22	36.,116	51.999	0,41	86,8	1630
10	Solar-Battery-Converter	12,4	-	-	2,75	20	24.186	33.067	0,28	100	0

optimizado (fila 1) mostrado en la Tabla III y en el segundo caso (10%) el software propone un sistema exclusivamente solar constituido por un arreglo fotovoltaico de 12,4 kW, un convertidor de 2,75 kW y un acumulador formado por 20 baterías LFP. Se puede observar que tanto la inversión inicial, el NPC y el costo de la energía son significativamente inferiores que el primer caso, por lo cual resulta una alternativa muy atractiva para implementar.

VII. CONCLUSIONES

El trabajo destaca la relevancia de la energía para el desarrollo humano, en especial de la energía eléctrica a partir de ER, incluso en combina-

ción con energía producida a partir de fuentes convencionales. En tal sentido, se contextualiza la situación de la energía en relación con el DH en el orden mundial, en la República Argentina y en la provincia de Santiago del Estero. Registra la ecuación de Pasternak que relaciona IDH con EE_p, exhibiendo gráficamente la curva correspondiente y datos del 2018 para algunos países[17]. El IDH para Argentina, la sitúa entre las naciones con Desarrollo Humano Muy Alto, pero se advierten desigualdades notorias con las realidades provinciales sobre todo del norte argentino y de la provincia mencionada. A su vez de los análisis realizados comparativamente para las distintas provincias argentinas, se concluye que Santiago del Estero es una de las que posee mayores requerimientos de energía en ARPoDs, lo cual se observa concreta-

mente a nivel de varios de sus departamentos, en particular el Departamento Mitre.

En virtud de lo expuesto, se expone una valoración de prefactibilidad técnica, económica y ambiental para implementar un sistema energético híbrido destinado a satisfacer la demanda de energía de una población aislada del sistema interconectado en el Departamento Mitre de la Provincia de Santiago del Estero (Argentina).

Se han propuesto y analizado varias combinaciones posibles de configuración de sistemas de energías con distintas fuentes primarias, constituyendo un conjunto de sistemas puros e híbridos compatibles para satisfacer la demanda energética.

Se modelaron todos los sistemas desconectados de la red (en isla) mediante el uso de un software ad-hoc reconocido. Por medio de este programa se propone implementar el sistema híbrido solar-fósil constituido por un arreglo fotovoltaico, un generador Diesel, convertidor bidireccional y un banco de acumulación, ya que es capaz de cumplir con los requerimientos de la demanda y considerar la mayor diversidad energética aprovechando los distintos recursos naturales disponibles. Por lo que se concluye que este sistema presenta mayor fiabilidad y estabilidad para la red aislada, y con una baja emisión de CO₂.

A partir de estos datos, se considera oportuno fomentar en ARPoDs la implementación de opciones similares a la planteada para el caso analizado, que combine fuentes renovables y convencionales. Esto amerita la implementación de políticas de estado que las promuevan, sustentando equilibradamente los principios de equidad social y ambiental.

El proceso de desarrollo en la provincia de Santiago del Estero se interpreta importante, pues toma en cuenta su devenir histórico desde del Siglo XVIII, con sus ventajas y limitaciones, aunque con las acciones actuales adopta nuevo impulso, rescatando el pasado enmarcado en los ODS 2030, adecuando estos objetivos para su implementación local, lo que se plasma en las MDBA.

Como futuras líneas de trabajo se menciona la implementación de alternativas como la planteada en la ARPoD considerada, como así la identifica-

ción de otras áreas con características similares y el planteo de soluciones de provisión de energía para ellas, de modo que permitan mejorar la calidad de vida de esas poblaciones aisladas.

REFERENCIAS

- [1] World Energy Council. World Energy Trilemma Index 2018. <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Trilemma-Index-2018.pdf>. 2019.
- [2] World Energy Council – WEC (2012). World Energy Trilemma: Time to get real – the case for sustainable energy policy – Executive Summary. http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/01/PUB_World_Energy_Trilemma_2012_Executive_Summary1.pdf. 2013.
- [3] Organización de las Naciones Unidas (ONU). Agenda 2030 - Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). New York, 2015.
- [4] ONU. Cumbre del Milenio - Objetivos de Desarrollo del Milenio. New York, 2000.
- [5] A. Marcel. Cómo la energía limpia puede impulsar la recuperación de COVID-19. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, Área de Energía. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/blog/2020/how-clean-energy-can-power-a-covid-19-recovery0.html>. 2020.
- [6] Fernandez F., Ferreiro A., Juarez C., Moyano L., Ottavianelli E. Cambios en provisión de energía rural por la pandemia Covid-19: Análisis de posibles escenarios posteriores considerados desde WEC y ODS (ONU). 3° Congreso Internacional del Gran Chaco Americano. Santiago del Estero, 2020.
- [7] Instituto Geográfico Nacional (Argentina). División Política, Superficie y Población. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geografia/DatosArgentina/Poblacion2>. 2021.
- [8] D. Martine. Nueva definición de lo rural en América Latina y el Caribe en el marco de FAO para una reflexión colectiva para definir líneas de acción para llegar al 2030 con un ámbito rural distinto. Serie “2030 - Alimentación, agricultura y desarrollo rural en América Latina y el Caribe”, Documento N° 2, FAO. Santiago de Chile. 2019. Recuperado de <http://www.fao.org/3/ca5509es/ca5509es.pdf>. 2019.
- [9] S. Leila et al. ODS y Nueva Ruralidad. Diagnóstico para el abordaje del fenómeno de Nueva Ruralidad en la adopción de la Agenda 2030 en la Argentina. FAO. Recuperado de https://www.odsargentina.gob.ar/public/documentos/seccion_publicaciones/otrosdocumentos/ods_y_ruralidad_fao.pdf. 2020.

- [10] Organización de las Naciones Unidas para la pobreza rural en América Latina y el Caribe 2018. Santiago de Chile. Recuperado de <http://www.fao.org/3/CA2275ES/ca2275es.pdf>. Consultado 20/09/2020. 2018.
- [11] A. Penagos, C. Ospina. La Agenda 2030 y la transformación de los territorios rurales: un desafío para institucionalidad latinoamericana. Serie "2030 - Alimentación, agricultura y desarrollo rural en América Latina y el Caribe", Documento N° 31, FAO. Santiago de Chile. Recuperado de <http://www.fao.org/3/ca5432es/ca5432es.pdf>. 2019.
- [12] Indexmundi. Consumo de electricidad. <https://www.indexmundi.com/map/?v=81&r=xx&l=e>. 2018.
- [13] Banco Mundial Datos de población mundial. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TO.TL>. 2018.
- [14] PNUD. Informe sobre Desarrollo Humano 2019.
- [15] PNUD. Informe sobre Desarrollo Humano 2010.
- [16] Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Desarrollo Humano - Informe 1990. Tercer Mundo Editores. Bogotá, 1990.
- [17] A. Pasternak; Global Energy Futures and Human Development: A Framework for Analysis. U.S. Department of Energy. Lawrence Livermore National Laboratory. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/239193.pdf>. 2000.
- [18] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). Proyecciones provinciales de población por sexo y grupo de edad 2010-2040. Buenos Aires, 2013.
- [19] SEEN - Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales PERMER. Informe Estadístico Sector Eléctrico 2016 Anexo III. https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/mercado_electrico/estadisticosectorelectrico/2016/A3.PERMER_2016.pdf. 2020.
- [20] PERMER - Ministerio de Energía y Minería (15 de julio de 2020). PERMER en Pcia. de Santiago del Estero. <https://permer.se.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3723>. 2021.
- [19] A. Badri, "Surgical mask contact dermatitis and epidemiology of contact dermatitis in healthcare workers", *Current Allergy & Clinical Immunology*, vol. 30, pp. 183-188, sep 2017.
- [21] National Aeronautics and Space Administration - NASA. Consulta de datos meteorológicos. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. 2021.